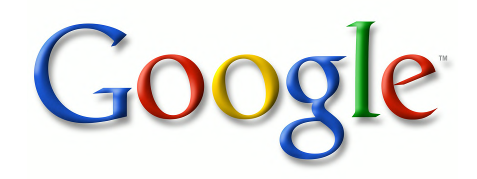
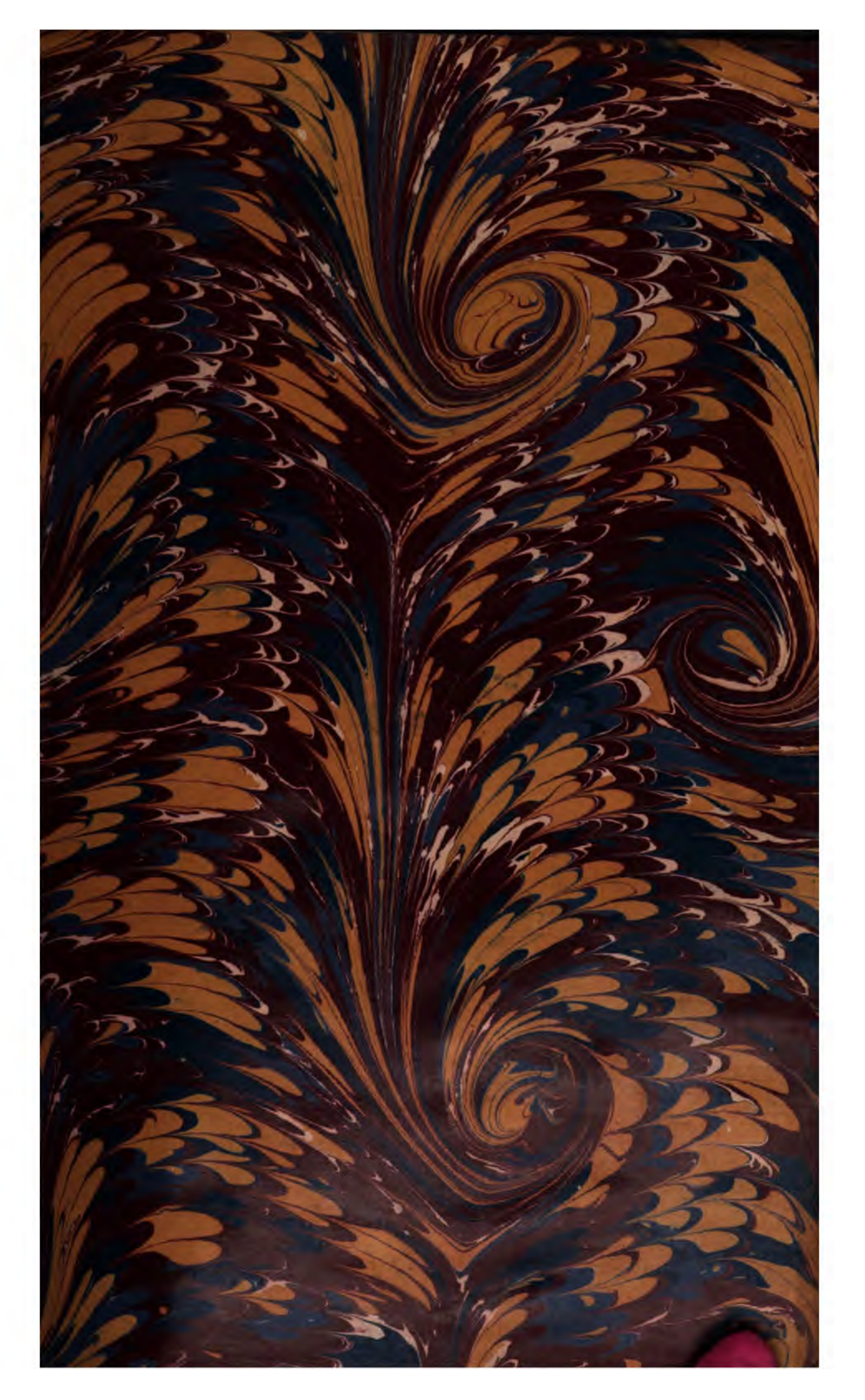



PRESS G. 6.
SHELF L.
Nº 12




600026733R

LE

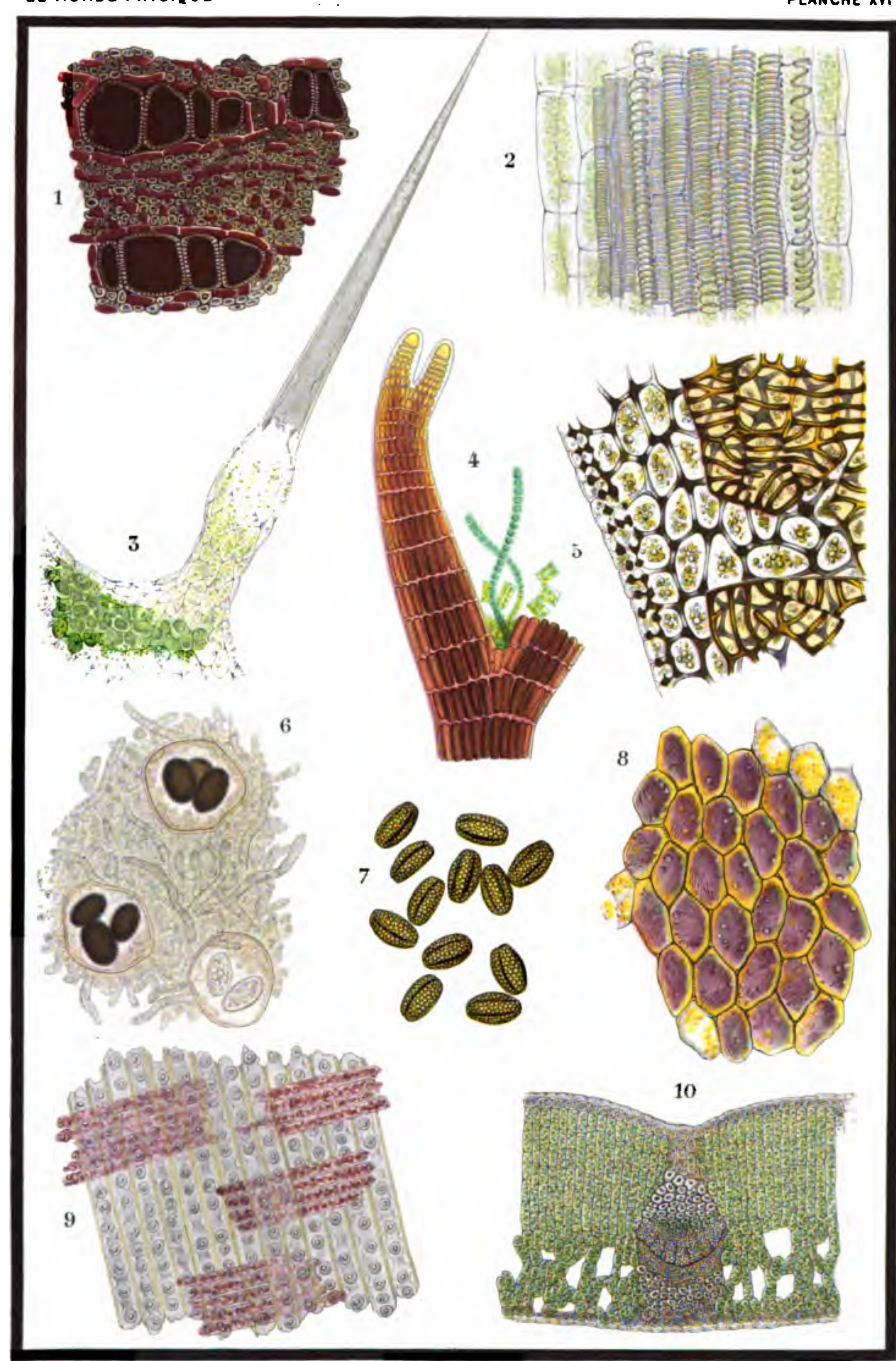
MONDE PHYSIQUE





PAR

PARIS. — IMPRIMERIE A. LAHURE
Rue de Fleurus, 9



G Pouchet inv[t] Th Deyrolle del P. Picart sc

LE MICROSCOPE

Appliqué à l'étude des Végétaux

1. Coupe mince de bois d'ébène, grossissement 350 d. – 2. Trachées des végétaux. 350 d. – 3. Poil d'ortie. 150 d. – 4. Fragment d'une petite algue rouge de nos côtes. 60 d. – 5. Fragment d'hépatique. 250 d. – 6. Fragment de truffe. 350 d. – 7. Grains de pollen. – 8. Fragment d'une fleur de giroflée. 350 d. – 9. Fragment de bois de cèdre. 350 d. – 10. Coupe transversale du milieu d'une feuille de buis.

LE
MONDE PHYSIQUE

PAR

AMÉDÉE GUILLEMIN

TOME SECOND

LA LUMIÈRE

CONTENANT

27 GRANDES PLANCHES TIRÉES A PART DONT 13 EN COULEUR
ET 353 VIGNETTES INSÉRÉES DANS LE TEXTE





PARIS
LIBRAIRIE HACHETTE ET CIE
79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

1882

LA LUMIÈRE

LE

MONDE PHYSIQUE

LA LUMIÈRE

PREMIÈRE PARTIE

LES PHÉNOMÈNES ET LEURS LOIS

Entre le Son, que nous avons étudié dans le premier volume du MONDE PHYSIQUE, et la Lumière, qui va faire l'objet de celui-ci, il n'y a en apparence aucune analogie, aucun lien, comme il semble n'y en avoir aucun entre les phénomènes sonores et ceux de la gravitation ou de la pesanteur. Cependant la science nous apprend que la sensation de la lumière est déterminée en nous par l'impression, sur notre rétine, d'une série d'ondulations excessivement rapides émanées des sources lumineuses. Ces ondulations sont elles-mêmes excitées et développées par les vibrations synchrones dont ces sources sont le siège, et elles se propagent au sein d'un milieu éminemment fluide et élastique qui remplit tout l'espace, l'éther. C'est ainsi que nous avons vu le son résulter des vibrations moléculaires des corps élastiques

et se propager dans des milieux tels que l'air, sous la forme d'ondes sphériques, jusqu'à l'organe de l'ouïe.

Comme le son, la lumière est donc un mode particulier de mouvement vibratoire; et l'on verra bientôt cette analogie se poursuivre jusque dans l'énoncé des lois de la propagation des ondes lumineuses, lesquelles se formulent à peu de chose près comme les lois relatives aux ondes sonores. Enfin, de même que les sons se distinguent les uns des autres par certaines propriétés, telles que l'intensité, la hauteur et le timbre, qui dépendent des conditions dans lesquelles s'effectue le mouvement vibratoire, la lumière offre pareillement des variations d'éclat, de couleur, de nuances produites par des causes toutes semblables.

Toutefois il existe entre les deux ordres de phénomènes, outre des différences considérables de mesure, cette autre différence capitale, à savoir que le son exige, pour sa production et sa propagation, l'intermédiaire de la matière pondérable, tandis que la lumière a sa source et son véhicule dans un milieu impondérable. Un même principe, l'élasticité, sert bien de point de départ à la théorie de la lumière comme à la théorie du son; mais, dans l'une, c'est l'élasticité moléculaire des corps, dans l'autre, c'est l'élasticité de l'éther.

Il est utile, croyons-nous, d'insister à l'avance sur ces vues générales. Elles permettent de rapprocher des branches de la science en apparence étrangères les unes aux autres, de montrer le lien qui unit les divers phénomènes du monde physique, et de reconstituer ainsi, au moins en partie, l'unité qu'on pourrait croire détruite en quelque sorte par les nécessités de l'analyse scientifique. Cette reconstitution, il est vrai, n'est pas toujours possible; et nous avons vu qu'on ne fait guère qu'entrevoir encore le moment où les phénomènes de gravitation seront rattachés, comme le sont dès maintenant ceux de la lumière et de la chaleur et probablement ceux de l'électricité et du magnétisme, à un même principe universel, à un même agent physique, l'éther.

CHAPITRE PREMIER

LA LUMIÈRE DANS LA NATURE

§ 1. LES PHÉNOMÈNES DE LA LUMIÈRE A LA SURFACE DU GLOBE TERRESTRE.

Qui voudrait entreprendre la description détaillée des phénomènes que les seules variations de la lumière du jour produisent à la surface de notre planète, dans l'atmosphère et sur le sol, au sommet des montagnes comme au niveau des plateaux et des plaines, dans les régions brûlantes de la zone torride comme dans les solitudes glaciales des contrées polaires ou dans les riants paysages de la zone tempérée, ne risquerait rien d'emprunter aux poètes et aux peintres les éléments de ses tableaux. Aux premiers il demanderait le secours de leur merveilleux langage ; les autres lui fourniraient les couleurs de leur riche palette et le prestige d'une reproduction fidèle.

N'ayant à notre disposition ni l'une ni l'autre de ces ressources, nous ne pouvons donner ici qu'une rapide esquisse des principaux phénomènes lumineux dont l'atmosphère est le siège. Les uns, périodiques et réguliers, dépendent des mouvements mêmes de la Terre ; mais ils présentent le plus souvent, selon les saisons et les climats, de telles variations et de tels contrastes, que leur retour est toujours, pour l'observateur, l'occasion de sensations nouvelles : la variété prévient ainsi toute monotonie. Les autres ne se produisent que dans des circonstances particulières, et alors la rareté de leurs manifestations se joint à leur beauté propre pour exciter l'intérêt de ceux qui en sont témoins.

Tous offrent à l'artiste, au poète, comme à l'homme de science, une mine, pour ainsi dire inépuisable, de sujets d'études et de recherches pour l'un, de motifs de paysage ou de thèmes de contemplation pour les autres.

Le jour, la nuit, les crépuscules, les aurores sont les plus simples, les plus fréquents, les plus familiers de ces phénomènes. Quelle prodigieuse variété cependant, en ce qui regarde l'éclat de la lumière, les tons, les couleurs et les nuances, leur succession ne produit-elle pas dans l'air et les nuages, à la surface du sol et sur les eaux! Dans le même lieu, selon l'heure du jour, l'époque de l'année ou l'état du temps, la physionomie du paysage change, prend les aspects les plus opposés, tantôt gaie, souriante, nuancée des teintes les plus tendres, les plus harmonieuses, tantôt sombre, triste, monotone ou pleine de contrastes violents, tantôt enfin éclatante, lumineuse et colorée.

Si des zones tempérées où ces changements, ces transformations sont les plus apparents et les plus rapides, on passe aux contrées qui avoisinent les pôles, ou si, au contraire, on s'avance vers les zones de l'équateur et des tropiques, alors on voit les variations s'amoindrir, la succession des phénomènes devenir plus lente. Mais aussi le contraste s'accentue et finit par atteindre son maximum. D'un côté, plus on approche de l'un ou de l'autre pôle, plus les nuits, plus les jours s'allongent, jusqu'à se partager l'année : pendant des mois, le soleil disparaît de l'horizon; la seule lumière est celle de la lune et des étoiles, si toutefois le ciel n'est pas couvert de brumes épaisses, ou encore celle du crépuscule et des aurores polaires. Puis à ces longues ténèbres succède un jour non moins long, pendant lequel un soleil pâle décrit au-dessus de l'horizon ses lentes spirales.

Entre les tropiques, au contraire, le jour et la nuit se succèdent à des intervalles à peine inégaux dans tout le cours de l'année; un ciel étincelant illuminé d'un soleil qui monte tous les jours presque jusqu'au zénith; pas de crépuscules ni d'aurores; de profondes nuits resplendissantes de l'éclat des étoiles

et de celui de la Voie Lactée : tel est, au point de vue de la lumière, le tableau des phénomènes que présentent les régions intertropicales.

Laissons parler un voyageur qui est aussi un savant, M. Charles Martins, et empruntons-lui deux ou trois tableaux où il a décrit, d'après nature, les paysages de l'une et de l'autre zone. L'inté-



Fig. 1. — La lumière dans la nature. Paysage de la zone tempérée.

ressant ouvrage où nous puisons nos citations, exprime précisément par son titre, *Du Spitzberg au Sahara*, le contraste que nous voulons faire ressortir.

Voici, en premier lieu, la description d'un paysage polaire au Spitzberg : « Le temps, dit-il, y est d'une inconstance remarquable. A un calme plat succèdent de violents coups de vent. Le ciel, serein pendant quelques heures, se couvre de nuages; les brumes sont presque continuelles et d'une épaisseur telle,

que l'on ne distingue pas les objets à quelques pas devant soi ; ces brumes, humides, froides, pénétrantes, mouillent souvent comme de la pluie. Les orages sont inconnus dans ces parages; même pendant l'été, jamais le bruit du tonnerre ne trouble le silence de ces mers désertes. Aux approches de l'automne, les brumes augmentent, la pluie se change en neige; le soleil s'élevant de moins en moins au-dessus de l'horizon, sa clarté s'affaiblit encore. Le 23 août, l'astre se couche pour la pre-



Fig. 2. — La lumière dans les régions polaires. Disparition du soleil.

mière fois dans le Nord : cette première nuit n'est qu'un crépuscule prolongé; mais, à partir de ce moment, la durée des jours diminue rapidement. Enfin, le 26 octobre, le soleil descend dans la mer pour ne plus reparaître. Pendant quelque temps encore, le reflet d'une aurore qui n'annonce plus le jour illumine le ciel aux environs de midi, mais ce crépuscule devient de plus en plus court et de plus en plus pâle, jusqu'à ce qu'il s'éteigne complètement. La lune est alors le seul astre qui éclaire la terre : sa lumière blafarde, réfléchie par les neiges,

révèle la sombre tristesse de cette terre ensevelie sous la neige et de cette mer voilée par la brume figée par la glace.

« Mais d'autres clartés remplacent celle de la lune : ce sont celles des aurores boréales, qui, fortes ou faibles, se montrent toutes les nuits pour l'observateur attentif... A partir du milieu de janvier, le crépuscule de midi devient plus sensible, l'aurore annonçant le retour du soleil s'agrandit et monte vers le zénith. Enfin, le 16 février, un segment du disque solaire, semblable



Fig. 5. — La lumière dans les régions polaires. Le retour du soleil.

à un point lumineux, brille un moment pour s'éteindre aussitôt; mais, à chaque midi, le segment s'élargit, jusqu'à ce que l'orbe tout entier s'élève au-dessus de la mer : c'est la fin de la longue nuit de l'hiver. Des alternatives de jour et de nuit se succèdent pendant soixante-cinq jours, jusqu'au 21 avril, commencement d'un jour de quatre mois, pendant lesquels le soleil tourne autour de l'horizon sans jamais disparaître au-dessous. »

Du Spitzberg, que douze degrés seulement séparent du pôle, allons maintenant au Sahara, dont les limites méridionales sont

à la même distance de douze degrés de l'équateur. Le contraste est aussi frappant que possible. « Chaque jour, dit M. Martins, des spectacles grandioses s'offraient à notre vue. Tantôt c'était l'immensité d'un plateau sans limites, de larges vallées, de grands lacs, des dunes aux formes variées, tantôt une fertile oasis flanquée de villages entourés de fortifications pittoresques. La vue des montagnes lointaines ajoutait à ces aspects un charme inexprimable... Le spectacle du ciel n'était pas moins intéressant que celui de la terre. Sur la mer et dans tous les pays plats où la coupole céleste s'arrondit au-dessus d'une surface unie sans relief et sans accidents, l'homme porte ses regards vers le ciel ; la vue des nuages, du soleil, de l'aurore, du crépuscule, des étoiles, remplace l'aspect lointain de la terre, des rivières, des lacs, des collines et des montagnes. Chaque coucher de soleil était une fête pour nos yeux, un étonnement pour notre intelligence, surtout lorsque l'atmosphère n'était pas complètement sereine. Les colorations sont alors plus vives et plus variées. A mesure que l'astre s'approche de l'horizon, les nuages gris et échevelés de la voûte du ciel, derniers émissaires des brouillards du nord, se frangent de teintes pourpres de plus en plus intenses, tandis que les contours arrondis des nuages blancs reposant sur les cimes lointaines se bordent d'un éclatant liséré jaune, et semblent enchâssés dans l'or qui remplit le couchant. Dès que le soleil est descendu sous l'horizon, une teinte rose des plus douces se répand sur tout le ciel occidental. Émanation de l'astre disparu, elle colore toutes les montagnes. Une d'elles, visible de Biskra, est appelée *Djebel-Hammar-Kreddou* (la montagne à la joue rose) : elle mérite ce nom, car longtemps encore après le coucher du soleil elle conserve un reflet rose comme l'incarnat des joues d'une jeune fille. Par un effet de contraste avec le rouge, le bleu du ciel prend une teinte vert d'eau. Peu à peu le rose pâlit, l'arc éclairé se rétrécit, mais la lumière qui l'illumine est blanche et pure comme celle qui doit briller dans l'éther au delà des limites de notre atmosphère. Grâce à la transparence de l'air, tous les contours des objets terrestres

sont parfaitement arrêtés. Les fines découpures des feuilles de palmier deviennent plus visibles qu'en plein jour, et quand l'arbre tout entier se détache sur ces fonds alternativement jaunes, rouges et blancs, il semble que la poésie de ce noble végétal se révèle aux yeux pour la première fois. Cependant la nuit se fait. Les planètes, puis les grandes constellations apparaissent les premières ; le ciel se peuple de myriades d'étoiles, sa voûte s'éclaire ; la Voie Lactée, bande blanchâtre et effacée dans les hautes latitudes, semble une écharpe de diamants étincelants jetés sur le dôme céleste. La lune n'est plus cet astre blafard dont le regard mélancolique semble compatir à la tristesse de nos pays embrumés ; c'est un disque brillant de l'argent le plus pur, réfléchissant sans les affaiblir les rayons qu'il reçoit, ou un croissant complété par la lumière cendrée qui dessine visiblement les contours de l'orbe tout entier. »

Terminons par ces quelques lignes où le même auteur décrit l'aspect du ciel d'Égypte à la pointe du jour. « En arrivant près du Caire, le soleil n'était pas encore levé, mais une aube matinale d'une couleur opaline s'élevait dans le ciel ; l'air était d'une transparence et d'une limpidité inouïes ; les cimes des palmiers semblaient enveloppées d'une auréole de clarté. Je compris ce que les voyageurs ont écrit sur les prestiges de la lumière aux Indes Orientales : rien, en effet, ne peut remplacer les féeries de cette magicienne qui prête des charmes au désert, et dont l'absence décolore et attriste les plus beaux paysages. »

Dans nos pays de la zone tempérée, les phénomènes de lumière n'ont pas sans doute l'intensité de ceux qui donnent aux paysages des zones extrêmes une physionomie aussi expressive. Mais ils offrent cet avantage qu'ils réunissent les caractères opposés : nos hivers les plus longs et les plus rigoureux nous donnent une idée des sensations que doit faire naître la contemplation des régions glacées voisines du pôle, et parfois nos étés sont assez beaux pour nous faire comprendre la splendeur du ciel tropical.

Les phénomènes optiques naturels dont nous venons de tra-

cer une esquisse fort sommaire, sont de ceux que ramène chaque jour, chaque saison, ou chaque année. Bien que fort variés, ils s'expliquent par les simples changements que produit dans l'atmosphère, dans la façon dont elle est illuminée, le double mouvement de rotation et de translation de la Terre. Selon que le soleil est plus ou moins élevé au-dessus de l'horizon, que les couches gazeuses qui nous entourent sont plus ou moins sèches ou humides et, par suite, d'une transparence plus ou moins grande, les rayons lumineux qui pénètrent dans ces couches sont brisés, dispersés, absorbés en des proportions infiniment variables : de là ces mille teintes, ces colorations qui prennent tous les degrés d'intensité, toutes les nuances du prisme, depuis le bleu azuré, limpide et profond du ciel des tropiques jusqu'au gris sombre et terne des pays couverts de brume, en passant par les tons fins, clairs et harmonieux de nos paysages tempérés. Il y a dans tous ces phénomènes d'optique tant de complications qui tiennent aux conditions atmosphériques, sans cesse changeantes, que la science aurait peine à les expliquer en détail. Il suffit qu'elle soit à même de les réduire à un petit nombre de faits simples, et de rattacher l'explication de ces faits à ceux que le physicien analyse dans son laboratoire.

D'autres phénomènes d'optique atmosphérique sont soumis à des lois plus régulières, sans offrir un moindre intérêt au point de vue de la beauté d'aspect qu'ils présentent au spectateur. Tels sont les arcs-en-ciel solaires et lunaires, les halos, parhélies, parasélènes, et ces phénomènes de mirage qu'on croyait d'abord particuliers aux déserts de sable de la zone torride et qu'on observe fréquemment dans les climats les plus opposés. Tous ces météores lumineux s'expliquent aisément par les lois connues de la marche de la lumière dans les divers milieux transparents, et leurs couleurs par la décomposition ou la dispersion qui en est la conséquence. Nous les décrirons plus amplement, lorsque le moment sera venu d'en exposer la théorie.

Quant aux aurores polaires, boréales ou australes, ce sont des phénomènes lumineux dont l'origine se rattache à l'état électrique ou magnétique du globe terrestre et dont les lois seules de l'optique ne parviendraient pas à rendre compte. Nous les retrouverons aussi en leur lieu.

§ 2. PHÉNOMÈNES DE LA LUMIÈRE SUR LES PLANÈTES ET SUR LA LUNE.

Tel est, dans son ensemble, le tableau des principaux phénomènes par lesquels se manifeste, à la surface de la Terre, l'agent physique dont nous allons étudier les lois. Ces lois sont universelles et s'appliquent, comme nous le verrons, à d'autres mondes que le nôtre; mais nous ne savons si dans ces mondes, dans les planètes par exemple, qui offrent avec la Terre tant d'analogies astronomiques et physiques, la lumière du Soleil donne lieu aux mêmes phénomènes optiques. Sans doute, à la surface de ces corps, de ceux du moins qui sont doués d'une atmosphère, les mêmes causes y doivent produire les mêmes effets; mais les conditions physiques et chimiques, par exemple la composition de leur enveloppe gazeuse, l'existence de telle ou telle substance, l'absence ou la présence de la vapeur d'eau, etc., peuvent y être si différentes, qu'il n'est pas possible de dire si l'aspect du ciel des planètes est ou non semblable à celui de notre ciel terrestre.

Ce qu'on peut évaluer, ce sont les valeurs relatives des quantités de lumière que le Soleil envoie à la surface de chaque globe planétaire; c'est aussi l'intensité de la lumière reçue, laquelle ne dépend que des distances des planètes au Soleil[1]. Par exemple, sur Mercure cette intensité est sept fois plus

1. Elle varie en raison inverse des carrés de ces distances. On verra plus loin, en effet, que l'éclat intrinsèque d'une source telle que le Soleil reste le même, tant que son disque conserve des dimensions apparentes sensibles. La quantité de lumière qu'il envoie est donc proportionnelle à la surface de ce disque, tel qu'il est vu de chaque planète, et cette surface varie elle-même, d'une planète à l'autre, en raison inverse des carrés de leurs distances respectives.

forte que sur la Terre, tandis que sur Neptune elle n'est que la millième partie de cette dernière. Mais il s'agit là de la lumière reçue à la limite extérieure de l'atmosphère de chaque planète : pour savoir ce qui se passe à cet égard à la surface même du sol, il faudrait pouvoir tenir compte de l'absorption de chaque atmosphère. Quant aux alternatives qui donnent le jour et la nuit, alternatives dues à la rotation de chaque globe sur son axe, elles se succèdent à peu près également sur les quatre planètes moyennes, Mercure, Vénus, la Terre et Mars; elles ont des périodes plus courtes sur Jupiter et Saturne, où le soleil reste à peine cinq heures sur l'horizon. Mais les longues saisons joviennes ou saturniennes compensent bien la brièveté des nuits et des jours.

Mars est probablement la planète qui ressemble le plus à la nôtre par sa constitution physique.

Le télescope y découvre des détails qui montrent sa surface partagée en espaces brillants reflétant vivement la lumière solaire et en espaces sombres où cette lumière est absorbée : ce sont probablement les continents et les mers. Aux pôles, des taches d'un blanc plus vif s'étendent ou se resserrent en latitude, selon que l'époque correspond à la saison d'hiver de Mars ou à celle d'été. On en conclut avec une grande probabilité que les taches blanches et mobiles des zones polaires sont produites par l'accumulation des neiges et des glaces. Enfin, on a pu observer d'autres taches mobiles grisâtres qui seraient les nuages flottant dans l'atmosphère. Tout fait donc présumer qu'il y a là une constitution physique se rapprochant beaucoup de celle de la Terre, et les personnes qui ont une imagination un peu vive se laissent aller volontiers à dépeindre les paysages de l'intéressante planète. Mais les phénomènes de lumière n'y sont-ils pas néanmoins fort différents de ceux que nous observons ici-bas? La teinte rougeâtre des continents qui fait paraître d'un gris verdâtre celle des espaces où l'on soupçonne des mers, n'est-elle pas un indice d'une constitution spéciale de l'enveloppe gazeuse de Mars, et de propriétés toutes par-

ticulières relativement aux phénomènes lumineux dont cette enveloppe est le siège? Toutes les conjectures à cet égard sont permises, et il nous semble impossible qu'on préjuge l'aspect du ciel de Mars par comparaison avec celui qui est visible sur la Terre.

Peut-être cela est-il plus aisé en ce qui concerne la Lune. Peut-être a-t-on le droit d'affirmer que, sur notre satellite, cet

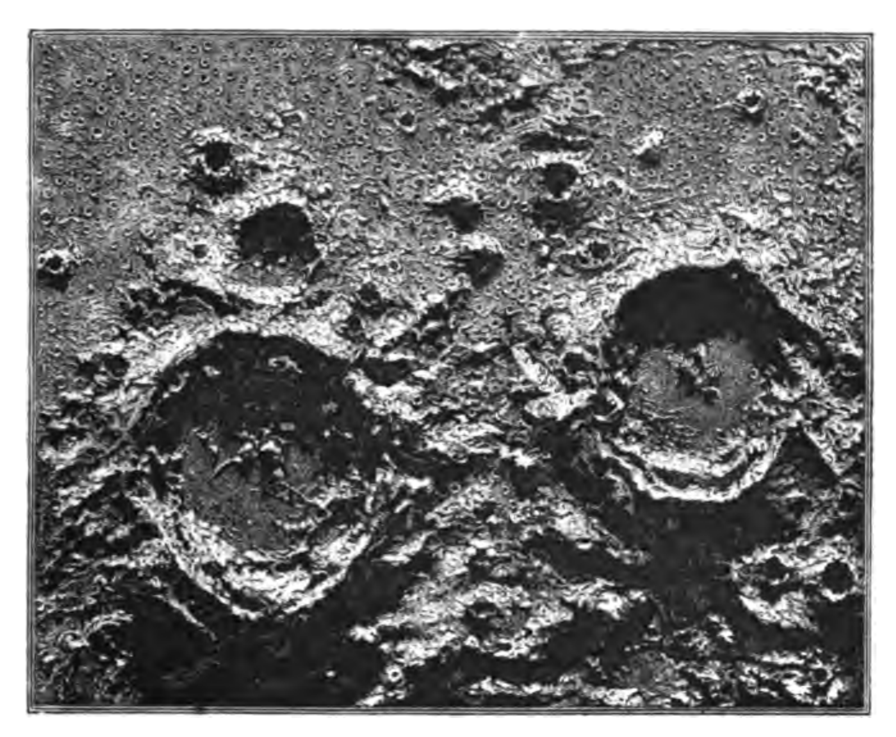


Fig. 4. — Montagnes de la Lune vues au télescope.

aspect présente avec l'aspect des paysages terrestres un contraste très grand, dont il est facile de se faire une idée. La Lune est, sinon complètement, du moins à peu près totalement privée d'atmosphère. A sa surface il n'existe point non plus d'eau ni de liquide évaporable. Les paysages lunaires offrent donc une crudité de tons qui n'existe nulle part, sous aucune zone, dans nos paysages, et qui paraît avec évidence dans toutes les observations télescopiques, quel que soit le grossissement qu'on emploie. Le voile lumineux qui, pendant le jour, nous

masque les étoiles, même quand le ciel est le plus pur et le plus limpide, n'existant pas sur la Lune, le ciel des jours ne s'y distingue du ciel des nuits que par la présence du Soleil, dont le globe sans rayons, sans auréole, se détache sur un fond absolument noir. Les étoiles y brillent en tout temps, avec un éclat qui doit permettre de distinguer les plus petites, et la Voie Lactée s'y détache avec une netteté, une splendeur qui nous est inconnue.

Quant au sol lunaire, aux aspérités si étranges et si accentuées qui le parsèment, aux milliers de cavités de toutes dimensions dont il est criblé, l'éclat et la crudité de leur lumière aveugleraient celui qui pourrait les observer de près; c'est à peine si les ombres noires des parties non éclairées sont tempérées par les reflets de celles qui reçoivent la lumière du Soleil. Dans un paysage lunaire, la perspective aérienne n'existe point, et dès lors il n'y a plus de ces transitions, de ces nuances, de ces gradations vaporeuses, ni de ces variations de couleurs qui donnent tant de charme aux paysages terrestres, même dans les climats les plus déshérités de notre globe. La longue durée des jours et des nuits (en moyenne vingt-neuf fois et demie plus grande que sur la Terre) doit ajouter encore à la monotonie d'aspect de cette terre ruinée.

§ 3. LES PERCEPTIONS EXTERNES, LA LUMIÈRE ET LE SENS DE LA VUE.

De tous les agents physiques qui impressionnent nos sens, et qui, par leur intermédiaire, nous mettent en communication avec le monde extérieur, aucun n'a autant d'importance que la lumière.

Sans la lumière, ou, ce qui revient au même, sans l'organe de la vue, nos connaissances sur les corps ou les êtres dont l'univers se compose, seraient nécessairement fort restreintes. Par le toucher seul, dont l'odorat et le goût peuvent être regardés comme des modifications ou des variétés, nous ne serions on

relation qu'avec les objets auprès desquels nous pourrions nous transporter jusqu'au contact. L'ouïe nous permettrait déjà sans doute de percevoir les mouvements intimes de corps étrangers situés à distance ; mais cette sensation seule nous aiderait tout au plus à juger de la direction où ces corps se trouvent ; encore ne pourrions-nous dépasser ainsi les limites, relativement très bornées, de la Terre même et de son atmosphère.

Que saurions-nous, privés de la lumière ou du sens de la vue, de la forme, des dimensions, de la distance et de la position relative des corps situés dans ces limites? Quelle conception pourrions-nous avoir de ces propriétés variées par lesquelles ils se différencient entre eux, de leur ordre, de leurs mouvements? Presque tout le domaine immense des sciences physiques et naturelles nous serait interdit. Nous ne pouvons même nous faire une idée de l'extrême petitesse du cercle auquel se borneraient nos connaissances, par l'observation de ce que sont les aveugles-nés : en effet, il est bien vrai que les aveugles-nés ne savent rien par eux-mêmes de ce qu'est la lumière, la couleur; mais, par l'éducation, le langage, par le secours des clairvoyants avec lesquels ils vivent, ils peuvent acquérir et ils acquièrent réellement une foule de notions dont leur infirmité les eût privés à jamais, s'ils eussent été seuls.

D'autre part, il faut avouer que la vue seule, sans le secours et le contrôle des autres sens, ne nous donnerait sur le monde extérieur que des notions fort vagues ; mais, grâce à l'éducation expérimentale qui résulte de leur concours, nous acquérons successivement l'idée de l'existence réelle de notre propre corps, puis de celle des corps étrangers, de leur forme, de leurs dimensions, de leurs distances. Nous jugeons de leur relief par les ombres et les lumières qui affectent leur surface, et l'innombrable variété des couleurs que cette surface présente nous aide à les distinguer les uns des autres, et à nous rappeler leurs propriétés spéciales. C'est enfin la lumière et le sens de la vue qui nous permettent de juger de leur état de repos ou de mouvement. Or la plupart des phénomènes dont les sciences natu-

relles et physiques étudient les lois, consistent en des mouvements, soit de l'ensemble des corps, soit de leurs parties, et c'est en observant les directions de ces mouvements, leurs vitesses, leurs périodes, qu'on parvient à la constatation de ces lois.

La vue simple suffit à nous procurer ces moyens précieux d'investigation scientifique. Combien plus sont-ils efficaces, lorsque nous pouvons y joindre les ressources des instruments d'optique, basés précisément sur la connaissance des lois des phénomènes lumineux! Par l'emploi de ces instruments, nous pouvons multiplier, dans une proportion énorme, la puissance de notre organe visuel! Grâce au télescope, le champ de l'astronomie, d'abord restreint aux seuls astres visibles à l'œil nu, s'est indéfiniment étendu : des régions inconnues de l'univers, peuplées d'innombrables mondes relégués à des distances effrayantes, ont été conquises dans le domaine de l'espace infini. Concentrée au foyer de nos puissants instruments, la faible lumière rayonnée par ces astres et qui se perdait pour ainsi dire avant de parvenir à impressionner notre rétine, multipliée par la surface des objectifs télescopiques, nous a prouvé l'existence de corps que l'imagination la plus hardie concevait à peine. De même, grâce au microscope, l'infiniment petit s'est révélé à nos yeux émerveillés, et nous avons pu pénétrer le secret de la constitution intime d'êtres dont auparavant nous ne soupçonnions pas même l'existence.

Dans tout cela, nous ne considérons la lumière que sous le rapport de son importance intellectuelle ou scientifique. Si nous passions de là au rôle qu'elle joue dans l'économie de la nature, à l'influence qu'elle a sur notre existence même, sur celle des êtres organisés ou vivants, nous verrions que cet agent physique n'est pas seulement utile, mais indispensable, et qu'il est une condition nécessaire de la vie, tout au moins à la surface du globe que nous habitons. Sans la lumière, en effet, les végétaux ne pourraient se développer; et dès lors la vie animale, qui est liée à l'existence des végétaux eux-mêmes, ne saurait être. Nous étudierons dans un chapitre spécial l'action de la

lumière sur les êtres organisés, et cette vérité, que nous ne faisons qu'énoncer et qu'effleurer ici, pour ainsi dire, apparaîtra dans tout son jour. Enfin, si la lumière, tout en exerçant sur la nature sa bienfaisante influence, cessait d'être perçue par nous, si l'homme était privé du sens de la vue, qui ne comprend que son existence serait, sinon absolument menacée, du moins bien compromise? Ce n'est pas la science seule qui alors serait en jeu, mais tout ce qui fait notre supériorité sur les animaux. Au reste, que serait pour nous la lumière sans l'organe par lequel nous en percevons les manifestations variées?

Comme le son, la lumière est pour l'homme un phénomène à la fois extérieur et intérieur.

Toute source lumineuse, — prenons le Soleil pour exemple, — est le foyer d'un mouvement vibratoire qui ébranle l'éther dans tous les sens, puis se propage avec une excessive rapidité sous la forme d'ondulations de périodes et d'amplitudes diverses. Ce mouvement traverse certains milieux, rencontre les corps, s'y réfléchit en partie, est absorbé pour une autre partie, se brise et se partage de diverses manières en produisant les effets les plus variés : ici, élévation de température; là, combinaisons et décompositions chimiques, etc. Tout cela est le côté extérieur du phénomène, la forme sous laquelle il existe, abstraction faite de l'homme ou de tout autre être susceptible d'éprouver la sensation de la lumière. Que maintenant, sur le trajet de ces radiations, se rencontre l'organe visuel de l'homme ou de tout autre être vivant : aussitôt l'ébranlement, en se communiquant par la rétine aux nerfs optiques, provoque pour eux la sensation de la lumière avec toutes ses modifications d'éclat et de couleurs. Voilà le phénomène intérieur, qui dépend de notre organisation, de notre sensibilité. Ce qui le prouve, c'est que, parmi les radiations émanées d'une source, il n'y a que celles qui ont une certaine rapidité dans leurs périodes qui donnent naissance à la sensation lumineuse. Les ondes moins rapides et plus longues donnent lieu à des phénomènes calorifiques sans qu'il y ait lumière; il en est de même des plus ra-

pides et des plus courtes, dont l'action se manifeste seulement sous forme de phénomènes chimiques.

Considérées en elles-mêmes, les ondes calorifiques, les ondes lumineuses et les ondes chimiques ne diffèrent cependant pas de nature : les unes et les autres sont des mouvements vibratoires, émanés des mêmes sources et produits par une même cause; leurs longueurs, la rapidité avec laquelle ces ondes se succèdent, sont, nous le répétons, les seuls éléments qui les différencient. Au sein de l'éther, du milieu éminemment élastique où elles se propagent, elles sont toutes confondues : c'est seulement à la rencontre des corps, soit inorganiques ou inertes, soit organisés ou vivants, minéraux, végétaux et animaux, solides, liquides ou gaz, ou en pénétrant dans leurs substances, que ces ondes se trouvent comme triées. C'est alors que se transforment ces mouvements vibratoires, et que les uns se manifestent comme chaleur, les autres comme activité chimique, les autres sous la forme de lumière.

Ainsi, on le voit par ce premier aperçu, la sensation de la lumière et des couleurs n'est autre chose que la propriété particulière aux nerfs optiques d'être impressionnés par des radiations d'une certaine intensité, émanées de ce qu'on nomme une source lumineuse. C'est une propriété toute relative à l'homme, et dans une mesure que nous ne connaissons pas exactement, aux animaux. Il est possible que certains êtres vivants perçoivent, comme lumière, des ondes qui, pour nous, sont exclusivement calorifiques, ou d'autres ondes, qui sont pour nous exclusivement chimiques.

§ 4. LES SOURCES DE LUMIÈRE ET LES MILIEUX OPTIQUES.

Deux conditions sont nécessaires pour que nous ayons la sensation de la lumière : la première est la présence, à une distance qui peut varier à l'infini, d'une *source lumineuse*, c'est-à-dire d'un corps dont l'état physique ou chimique est tel, que

ses molécules sont le siège des vibrations spéciales propres à ébranler de proche en proche l'éther, jusqu'à notre rétine, où le phénomène, d'extérieur qu'il était d'abord, devient intérieur. La seconde condition est que le milieu séparant la source de l'œil soit un milieu apte à transmettre les ondes de lumière émanées de la source.

Entrons sur ces deux points dans quelques détails préliminaires.

Les sources lumineuses *proprement dites* ou *directes* sont les corps où naît le mouvement lumineux. Le plus souvent, c'est la très haute température à laquelle ils sont soumis qui détermine leur incandescence : on verra plus loin que vers 500° ou 600° les corps deviennent lumineux ou visibles dans l'obscurité. C'est aussi fréquemment un phénomène chimique, la combustion, notamment la combustion des gaz, qui produit l'incandescence. Mais la lumière peut se manifester dans certains cas sans qu'il y ait de chaleur sensible développée, comme il arrive dans les corps phosphorescents.

Un corps qui n'est pas lumineux par lui-même, mais qui, recevant à sa surface la lumière d'une source, la renvoie ou la réfléchit, est rendu visible par cet éclairement : de sorte qu'il devient à son tour une source de lumière. C'est alors une source *indirecte* ou *secondaire*. Tandis que le Soleil, les étoiles sont des sources lumineuses proprement dites, la Lune et les planètes sont des sources lumineuses secondaires, puisqu'elles ne font que renvoyer dans l'espace une portion de la lumière qu'elles reçoivent du Soleil. Lorsque la Lune est visible, entre le dernier et le premier quartier, sous la forme d'un croissant, plus ou moins délié, on aperçoit très distinctement, à côté du ménisque lumineux, tout



Fig. 5. — Lumière cendrée.

le reste du disque : on nomme lumière cendrée la lueur d'aspect phosphorescent dont nous parlons. Cette lueur provient de la partie éclairée de la Terre, qui joue, dans les nuits de



Fig. 6. — Le clair de terre sur la Lune.

notre satellite, le rôle que ce dernier lui-même joue dans les nuits terrestres : c'est un *clair de terre* analogue en tous points à notre clair de lune. Ainsi la lumière cendrée est la lumière

solaire doublement réfléchie de la Terre à la Lune et de la Lune à la Terre. Nous avons à tout instant sous les yeux des phénomènes semblables : tout objet éclairé par une source directe éclaire à son tour les objets voisins, qui eux-mêmes renvoient cette lumière et deviennent, à des degrés de plus en plus éloignés, des sources lumineuses.

On pourrait encore distinguer les sources de lumière en sources naturelles et sources artificielles, les premières se subdivisant elles-mêmes en sources permanentes et en sources temporaires ou accidentelles. Le Soleil est pour notre monde une source lumineuse permanente; les bolides, les étoiles filantes, les aurores boréales sont des sources naturelles accidentelles. Quant aux sources artificielles de lumière, elles comprennent toutes celles que nous obtenons à la surface de la Terre par l'emploi des procédés industriels.

Parlons maintenant de la seconde condition nécessaire à la perception de la lumière, des milieux optiques.

Considérons une source, primitive ou secondaire, peu importe, de lumière, la flamme d'une bougie par exemple. Entre cette flamme et l'œil, qui éprouve la sensation lumineuse, il y a une certaine distance, dès lors un milieu ou une succession de milieux propres à laisser passer la lumière émanée de la source. L'œil lui-même est constitué par des milieux de ce genre que nous étudierons dans le chapitre consacré à la vision.

Cette propriété de laisser un libre passage à la lumière, d'une source à l'œil, a fait donner aux milieux dont nous parlons le nom de *transparents*, ou encore de *translucides*, ce dernier mot indiquant un degré moindre dans la propriété dont il s'agit.

L'interposition de certains autres corps ou milieux entre l'œil et la source peut au contraire être un obstacle à la perception lumineuse : ce sont les corps ou milieux *opaques*. C'est ce qui arrivera à notre bougie si, de la pièce où nous sommes et où elle est visible pour nous, parce qu'entre elle et notre œil il n'y a d'autre milieu que l'air, elle est transportée dans une pièce voisine, ou si on la masque par un écran. Dans ces deux

cas, elle devient elle-même complètement invisible : les murs de la chambre, l'écran en carton ou en bois, constituent le milieu opaque qui intercepte la lumière, ou qui est impropre à sa transmission.

Ainsi tous les milieux ne sont pas propres à la transmission de la lumière, et l'existence de corps transparents, translucides, est nécessaire à la perception. Mais quand cette condition est remplie, quand une source de lumière apparaît, si elle n'est séparée de l'œil que par un milieu translucide ou transparent, l'impression lumineuse est instantanée. Du moins, elle nous paraît telle dans les observations ou les expériences que nous pouvons faire spontanément à la surface de la Terre. De même, si la lumière vient à disparaître, nous ne pouvons constater aucun intervalle de temps appréciable entre l'instant de sa disparition réelle et celui de la cessation de la sensation lumineuse. Cependant en réalité on prouve, et nous verrons comment plus loin, d'une part, que la sensation lumineuse n'est pas instantanément détruite, ce qui tient à une certaine durée de l'impression sur la rétine, et, d'autre part, que la lumière se propage successivement dans l'espace, c'est-à-dire met un temps mesurable pour parcourir la distance comprise entre l'œil et la source. En disant que la lumière se propage, nous emploierons donc une expression conforme à la réalité des choses. Mais nous ferons d'abord abstraction de la durée de cette propagation, qui est d'ailleurs si rapide, qu'elle peut être considérée comme ayant une vitesse infinie dans la plupart des expériences instituées par les physiciens pour l'étude des phénomènes de la lumière.

Ajoutons quelques mots sur les milieux considérés par rapport à la propagation de la lumière. Nous les avons divisés en milieux transparents ou translucides et en milieux opaques.

La transparence et l'opacité ne sont jamais absolues.

Pour qu'un corps puisse être rangé dans la première classe, il faut non seulement qu'il laisse passer la lumière, mais encore que la visibilité des objets lumineux ou éclairés s'y fasse au

travers avec une certaine netteté. Dès que la forme et les contours de ces objets cessent d'être perceptibles sans que la lumière soit complètement éteinte, le milieu ou le corps est simplement dit *translucide*.

Le milieu doué de la plus grande transparence que nous connaissions est *le vide*. Quand nous disons *le vide*, nous entendons avec tous les physiciens, non pas le vide absolu, qui n'est qu'une pure hypothèse, mais un espace dépourvu aussi complètement que possible de toute matière pondérable. Telle est, dans une mesure toute relative, le vide obtenu à l'aide de la machine pneumatique, celui de la chambre barométrique, ou mieux encore l'espace interplanétaire ou intersidéral. La lumière qui nous arrive du Soleil, des étoiles, des nébuleuses, prouve assez qu'elle n'a pas besoin, comme le son, d'un milieu pondérable pour se propager, bien qu'avant d'arriver à notre œil elle ait dû traverser en dernier lieu l'épaisseur de notre atmosphère. La transparence de l'air, quoique bien évidente, est d'ailleurs infiniment moindre que celle de l'éther, puisque tout le monde peut constater l'affaiblissement d'éclat des objets lumineux, quand l'épaisseur des couches atmosphériques va en croissant[1].

Du reste, la transparence de l'éther ne paraît pas non plus être absolue. En se basant sur la distribution des étoiles de diverses grandeurs et sur la puissance de pénétration des télescopes, quelques astronomes ont cru pouvoir évaluer l'extinction que subit la lumière en se propageant dans l'espace éthéré. W. Struve, dans ses *Études d'astronomie stellaire*, admet « que l'intensité de la lumière décroît en plus grande proportion que la raison inverse des carrés des distances ; ce qui veut dire qu'il existe une perte de lumière, une extinction, dans le passage de la lumière par l'espace céleste. » Il évalue cette extinction à environ un centième de l'intensité pour le trajet de la lumière à

1. Il est possible, il est probable que l'absorption de lumière qui croit si rapidement près de l'horizon n'est pas due à la seule augmentation d'épaisseur et de densité des couches d'air, mais à la présence de corpuscules en suspension, molécules aqueuses, poussières, etc, beaucoup plus nombreux dans le voisinage du sol qu'à une certaine hauteur dans l'atmosphère.

travers une distance égale à celle des étoiles de première grandeur.

La transparence n'est pas une propriété qui appartienne exclusivement au vide des espaces célestes, à l'air et aux gaz; les liquides et les solides, comme l'eau, le verre, un grand nombre de substances cristallisées en jouissent également. Une lame de verre, une mince couche d'eau laisse voir, au travers de son épaisseur, les objets avec une grande netteté; mais cette transparence diminue assez rapidement à mesure que l'épaisseur augmente; d'incolore que paraît d'abord le milieu interposé entre l'œil et les objets, ce milieu prend une nuance de couleur de plus en plus foncée, jusqu'à ce que, l'absorption de la lumière devenant totale, on finisse par n'apercevoir plus rien que le milieu lui-même. C'est ainsi qu'un disque blanc, plongé dans la mer, en face de la côte de Civitta-Vecchia, alors que l'eau était parfaitement claire, d'une belle couleur et d'une grande pureté, disparaissait entièrement à une profondeur de 45 mètres au plus (expérience de M. Cialdi). « La couleur du disque devenait d'abord légèrement verdâtre, puis elle virait au bleu clair, et ce bleu s'assombrissait au fur et à mesure qu'on laissait descendre l'appareil, jusqu'à ce que sa couleur, étant devenue aussi sombre que celle de l'eau, il ne fut plus possible de la distinguer du milieu environnant. » Des disques teints en jaune et de couleur de vase de mer disparaissaient dans les mêmes circonstances à des profondeurs de 17 et de 24 mètres.

La transparence des gaz, de l'air atmosphérique quand il est bien pur, est beaucoup plus étendue. D'un sommet très élevé comme celui du mont Blanc, l'œil jouit d'un panorama immense, et distingue encore les objets à une distance considérable. D'après M. Martins, la portion de la surface de la Terre géométriquement visible du haut du mont Blanc est de 210 kilomètres. On pourrait donc de ce sommet, si la transparence de l'air était absolue, apercevoir le golfe de Gênes; mais, « au delà de 100 kilomètres, les objets voilés par le hâle sont confus et effacés. Jusqu'à 60 kilomètres tout est net et reconnaissable. »

Sans aucun doute, des points lumineux seraient vus pendant la nuit jusqu'à la limite du cercle de visibilité : telle était l'opinion de M. Martins et des savants qui l'accompagnaient, puisqu'ils s'étaient proposé d'échanger des signaux de feu avec la ville de Dijon, qui est un des points de cet immense horizon.

Outre les corps transparents ou diaphanes, il y a les corps simplement *translucides*, laissant passer la lumière sans permettre de distinguer les contours des objets : tels sont le verre dépoli, le papier, la corne, l'albâtre, certains liquides, comme le lait. En mouillant le papier ou en le recouvrant d'une mince couche d'huile, sa translucidité augmente et se change même en transparence quand le papier est suffisamment mince. Les minéralogistes nomment *hydrophane* une espèce d'opale (quartz résinite) qui est blanche et presque opaque à l'état ordinaire. Cette pierre devient translucide si on la laisse plongée dans l'eau un certain temps.

Les corps mêmes qu'on croirait doués d'une opacité absolue laissent passer une certaine quantité de lumière lorsqu'ils sont réduits en lames d'une très petite épaisseur. Les pierres, le bois, les métaux, une multitude d'autres substances, sont opaques. Cependant, si l'on place entre l'œil et la lumière du jour une feuille d'or, par exemple, — les batteurs d'or en obtiennent de si minces qu'il en faut superposer jusqu'à 10 000 pour avoir l'épaisseur d'un millimètre, — on aperçoit une belle couleur d'un bleu verdâtre qui témoigne de la transmission de la lumière, non pas à travers les fentes produites par le battage, mais dans la substance même du métal. D'après les expériences de M. A. Dupasquier, les feuilles minces d'argent, d'or vert (alliage d'argent et d'or) laissent aussi passer une faible lumière, dont la teinte est bleuâtre ; il en est de même des feuilles de cuivre, quoique la coloration d'un bleu noirâtre de la lumière transmise à travers ces feuilles soit moins régulière, ce qui tient évidemment aux inégalités d'épaisseur du métal. Ainsi, la transparence, la translucidité, l'opacité sont des propriétés toutes relatives : de l'éther interstellaire qui jouit au plus haut degré de la trans-

parence, aux métaux les plus opaques, il n'y a que des différences de degré. C'est l'extrême petitesse des objets dont les micrographes étudient la structure interne, — infusoires, microphytes, etc., — qui explique leur transparence.

Pour le moment, du reste, nous ne faisons qu'énumérer les corps qui jouissent à des degrés divers de la propriété de laisser passer la lumière à travers leur épaisseur. On verra plus loin quelles explications ont été proposées pour rendre compte de cette propriété et comment on la suppose liée à la structure moléculaire des milieux.

CHAPITRE II

PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE

§ 1. PROPAGATION DE LA LUMIÈRE DANS LES MILIEUX HOMOGÈNES.

Considérons une source lumineuse quelconque, primitive ou secondaire. Supposons qu'entre les divers points de cette source, située d'ailleurs à une distance indéterminée de l'œil, existe un milieu parfaitement transparent et homogène. L'observateur verra avec une égale netteté tous les points de la source.

Maintenant, sur la ligne droite qui joint à l'œil l'un de ces points, imaginons qu'on place un écran, c'est-à-dire un corps opaque : aussitôt le point correspondant de la source devient invisible. Ce fait d'expérience est, sauf des exceptions qui seront exposées plus tard, un fait général, dont on exprime la loi en disant que *la lumière se propage en ligne droite dans les milieux homogènes*.

La parfaite homogénéité que cette loi suppose n'est peut-être jamais rigoureusement réalisée. On la suppose telle dans les espaces célestes, là où existe le vide de matière pondérable, dans l'éther en un mot ; mais c'est une hypothèse dont la vérification est impossible. A la surface de la Terre, dans les milieux atmosphériques, l'homogénéité est très limitée ; elle exige que la densité de l'air soit partout la même, ce qui est peut-être le cas habituel des couches d'air à la surface du sol, quand la température est sensiblement égale dans tous leurs points, et

qu'on ne considère qu'une mince tranche horizontale de ces couches. Il en est encore de même pour une masse homogène de verre transparent, d'eau pure, etc., si le point lumineux est placé à la surface du milieu et l'œil en un point de la surface opposée.

Dans ces cas très simples, mais assez difficiles à réaliser rigoureusement, la *trajectoire* suivie par la lumière à l'intérieur du milieu homogène peut être considérée comme étant une *ligne droite*. On vérifie approximativement cette loi de la manière suivante.

Entre l'objet lumineux, la flamme d'une bougie par exemple, et l'œil, on interpose une série d'écrans opaques, percés chacun en leur milieu d'une petite ouverture. Si le point lumineux, les ouvertures des écrans et l'œil sont disposés en ligne droite, la lumière est visible. Qu'on vienne alors, soit à déranger de leur place la bougie, l'œil, ou l'un quelconque des écrans, de manière que les uns ou les autres ne soient plus sur une même ligne droite, l'observateur cesse de percevoir la lumière.

On peut faire la même expérience en sens inverse à l'aide de fils de soie ou de fils métalliques très fins, placés parallèlement les uns aux autres et dans un même plan : tout point lumineux situé sur le prolongement de cette direction sera éclipsé ou invisible ; qu'on vienne à l'en écarter d'un côté ou de l'autre, à l'instant sa lumière sera transmise à l'œil, il deviendra visible. Ceci s'applique aussi bien à la lumière émanée d'un objet non lumineux par lui-même qu'à celle d'une source proprement dite. Ainsi la lumière du jour ne peut se voir au travers d'un tube long et étroit si ce tube n'est pas rectiligne, ou du moins si la courbure est trop forte pour qu'une ligne droite ne puisse le traverser de part en part sans toucher les parois.

Enfermez-vous dans une chambre parfaitement close et obscure, et ne laissez passer la lumière du soleil que par un petit trou pratiqué dans le volet. Tout aussitôt vous verrez un cône lumineux marquer dans l'air le passage de la lumière (fig. 7), et vous constaterez aisément que les contours de ce

cône sont parfaitement rectilignes. Dans ce cas, ce n'est pas l'air lui-même qu'on aperçoit, mais bien les parcelles de poussière

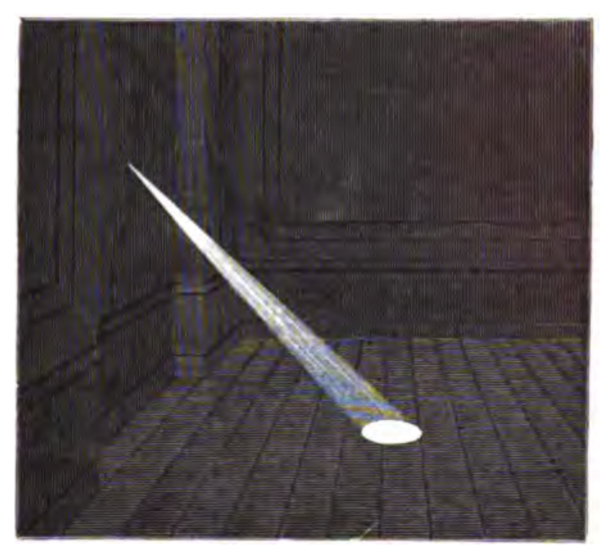


Fig. 7. — Propagation de la lumière en ligne droite. Faisceau de rayons solaires dans la chambre obscure.

ou de fumée en suspension dans l'air, que leur illumination rend visibles sur le fond obscur de la chambre.



Fig. 8. — Propagation rectiligne de la lumière. Les rayons solaires dans l'atmosphère.

On peut constater encore la propagation de la lumière en ligne droite quand le soleil, caché par une accumulation de

nuages, laisse jaillir ses rayons entre les ouvertures des nuées. On voit alors se projeter dans l'atmosphère des traînées plus ou moins lumineuses (fig. 8) qui affectent très visiblement une direction rectiligne. Mais nous verrons bientôt que, l'atmosphère étant composée de couches de densités variables, la lumière qui traverse successivement ces couches ne s'y meut plus en ligne droite. A la surface même de la Terre, pour que ce mouvement soit rigoureusement rectiligne, il faut que le milieu transparent, nous le répétons, soit parfaitement homogène, que ce milieu soit d'ailleurs de l'air, un gaz quelconque, de l'eau, du verre, etc.

Voici donc un premier principe, qui se formule ainsi : *La lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène.*

§ 2. PRINCIPE DE LA THÉORIE DES OMBRES.

C'est sur cette loi qu'est basée la théorie géométrique des ombres. Entrons à cet égard dans quelques détails.

Considérons un ou plusieurs corps opaques placés dans un milieu transparent et homogène, en présence d'un point lumineux ou d'une source de lumière de dimensions très petites. Ces corps seront illuminés ou *éclairés* dans tous les points de leur surface qu'on peut joindre à la source par des lignes droites non interceptées. Les autres points ne reçoivent pas directement de lumière : ils sont invisibles, ils sont dans l'obscurité ou dans l'*ombre*. Si, de la source, on mène par la pensée un cône tangent à la surface de chacun de ces corps, tous les points de l'espace situés derrière le corps et à l'intérieur du cône seront également privés de lumière. C'est à l'ensemble du prolongement obscur du cône dont nous parlons, et qui se projette à l'infini, qu'on donne le nom de *cône d'ombre*. Un écran opaque placé dans le cône d'ombre de manière à en déborder les contours sera obscur dans toute l'étendue de la section, et éclairé au contraire en tous ses autres points.

La ligne de séparation de la lumière et de l'*ombre portée* sur l'écran sera dans ce cas nettement tranchée, comme celle qui limite la partie éclairée et la partie obscure du corps opaque. Une simple considération géométrique, aisément vérifiée par l'expé-

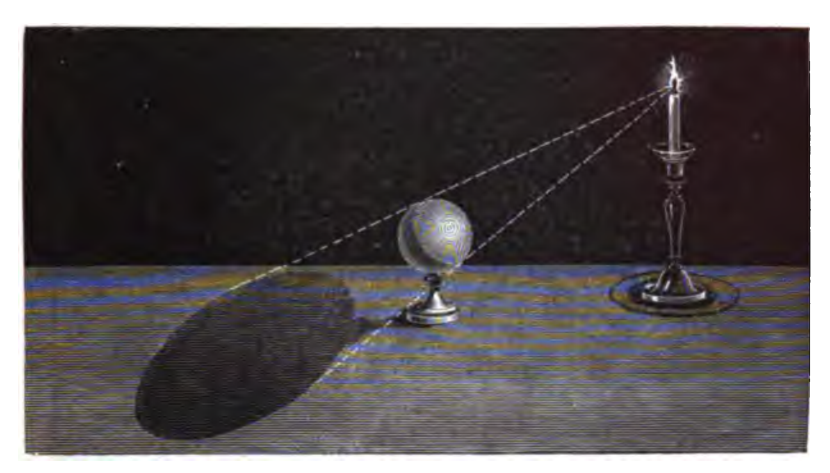


Fig. 9. — Cône d'ombre d'un corps opaque. Ombre portée.

rience, montre que les dimensions de l'ombre portée vont en croissant avec la distance de l'écran, et sont d'ailleurs d'autant plus grandes pour une même distance, que le corps opaque est plus rapproché de la source de lumière.

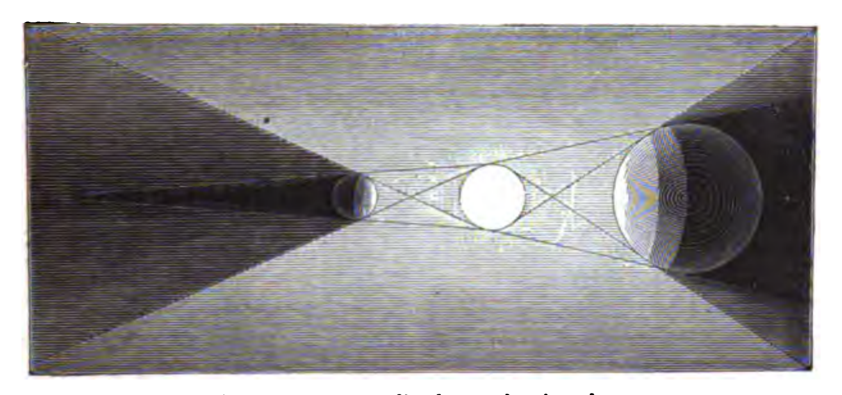


Fig. 10. — Cônes d'ombre et de pénombre.

Supposons maintenant, comme cela a presque toujours lieu dans la pratique, que la source ait des dimensions finies, appréciables. Dans ce cas, la surface du corps opaque et l'espace qui l'environne se composent de trois parties distinctes : l'une,

dont les points sont éclairés à la fois par toute la surface; une autre, dont aucun point ne reçoit de lumière, et enfin une troisième, intermédiaire entre les deux autres, dont chaque point

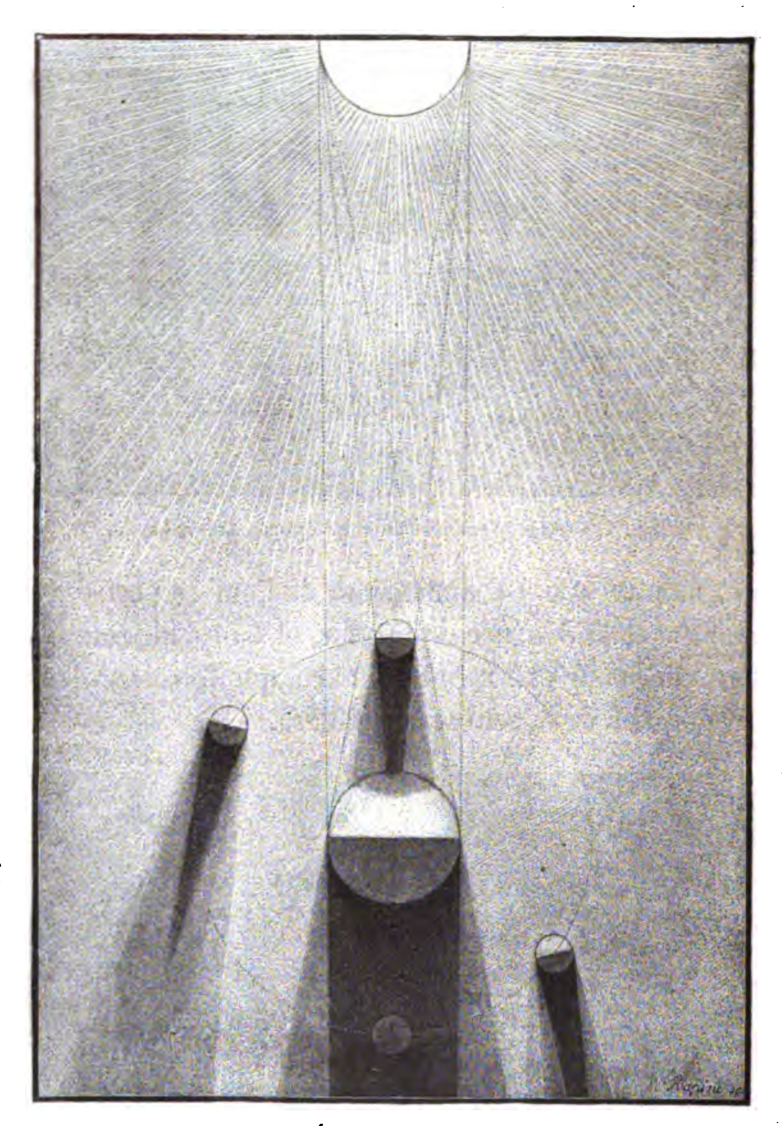


Fig. 11. — Éclipses de Soleil et de Lune.

ne reçoit qu'une fraction plus ou moins grande de la lumière totale. Outre l'ombre du corps et le cône d'ombre, projeté dans l'espace, il y a donc à la surface du corps une portion moins éclairée, qu'on nomme la *pénombre*, et dans l'espace un *cône*

de pénombre se projetant pareillement à l'infini. L'examen de la figure 10 fait aisément comprendre pourquoi le cône d'ombre est limité quand la source de lumière a des dimensions supérieures à celles du corps opaque, tandis qu'il reste infini si ces dimensions sont moindres; ce serait un cylindre dans le cas très particulier où la source et le corps opaque auraient à la fois des dimensions égales et similitude de position et de forme.

Ce sont là autant de conséquences de la loi de propagation rectiligne de la lumière dans les milieux homogènes. Et l'expérience montre bien que cette loi est vraie, au moins approximativement; mais il faut bien comprendre qu'elle n'est pas

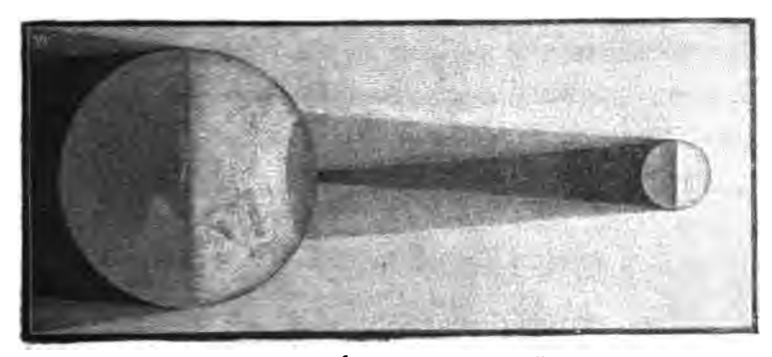


Fig. 12. — Éclipse totale de Soleil.

susceptible de vérifications expérimentales rigoureuses. En effet, dans le cas le plus ordinaire des sources de lumière de dimensions finies, les pénombres donnent, au delà des contours de l'ombre proprement dite, des dégradations insensibles d'intensité, depuis la pleine lumière jusqu'à l'ombre pure, et on ne peut saisir la limite exacte ni de celle-ci, ni de celle-là. Si, au contraire, on veut réduire la source à des dimensions très petites, on voit se produire, quand elle approche d'être un point lumineux, des phénomènes singuliers, des bandes alternantes de lumière et d'ombre qui rendent toute vérification de la loi impossible.

Les éclipses de Soleil et de Lune réalisent pour nous dans la nature, et sur la plus grande échelle, la théorie géométrique

des ombres et pénombres. Quand le disque opaque de la Lune se trouve interposé en ligne droite entre le Soleil et la surface du globe terrestre, l'ombre portée constitue pour les lieux

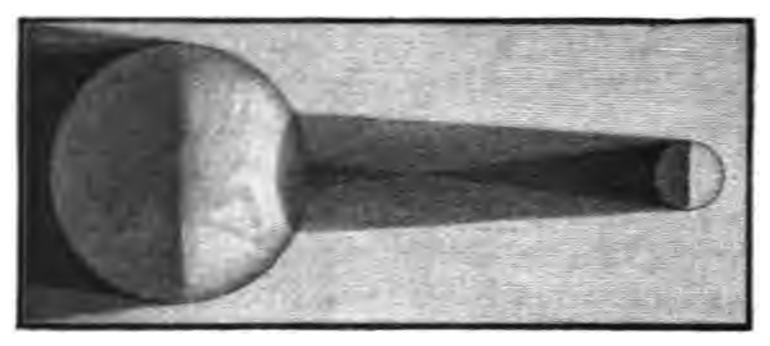


Fig. 13. — Éclipse annulaire de Soleil.

qu'elle rencontre une éclipse soit totale, soit annulaire de Soleil, selon que les dimensions apparentes du disque lunaire se trouvent plus grandes ou plus petites que celles du Soleil,

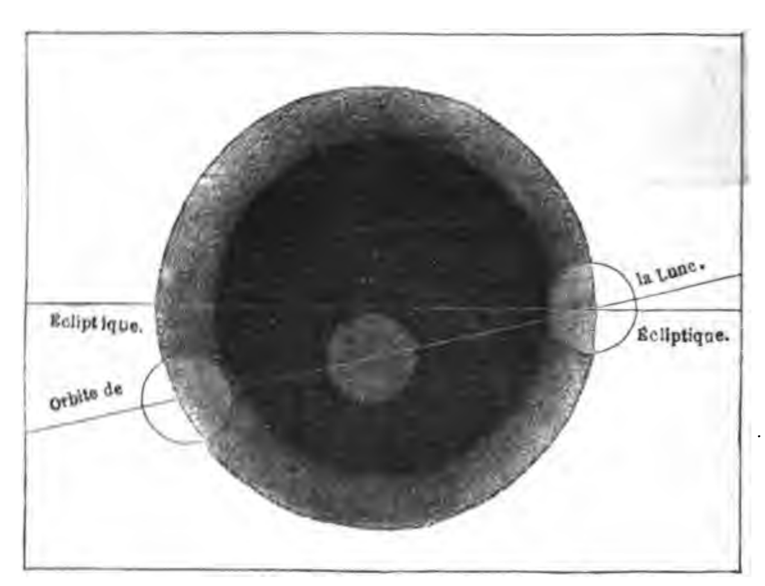


Fig. 14. — Éclipse totale de Lune.

ou, ce qui revient au même, selon que le sommet du cône d'ombre de la Lune atteint ou n'atteint point la Terre. De part et d'autre de la ligne centrale obscure de l'éclipse, il y a une série de lieux pour lesquels le disque solaire est plus ou moins éclipsé

ou échancré par la Lune; ces lieux sont dans la pénombre : il y a pour eux éclipse partielle de Soleil. Les éclipses de Lune, produites par le passage de cet astre dans les cônes d'ombre et de pénombre de la Terre, sont produites de la même façon et constituent des éclipses totales ou partielles de Soleil pour la Lune. Seulement, l'existence de l'enveloppe gazeuse qui forme notre atmosphère modifie, comme nous le verrons plus loin, les dimensions réelles du cône d'ombre terrestre, et il faut tenir compte de ces modifications pour expliquer les circonstances d'ailleurs variables du phénomène des éclipses lunaires. A ce point de vue, la théorie géométrique des ombres n'est pas directement applicable à ce cas particulier.

D'autres phénomènes semblables se passent (et sont observables pour nous) dans les autres corps du système planétaire. Tels sont les passages de Vénus et de Mercure sur le disque du Soleil, les éclipses des satellites de Jupiter, ou encore les projections des cônes d'ombre de ces satellites sur le disque lumineux de la planète. C'est l'observation des éclipses des satellites de Jupiter qui a permis la première constatation et la première mesure de la vitesse de propagation de la lumière.

A la surface de la Terre, on peut vérifier journellement, mais à la vérité d'une façon tout approximative, les effets d'illumination, d'ombre et de pénombre qui sont une conséquence de la loi de propagation rectiligne de la lumière.

Quand la lumière est directe et d'une suffisante intensité, comme celle du Soleil ou d'une source artificielle, lampe, bougie, bec de gaz, les ombres sont relativement tranchées; les parties éclairées et les parties obscures des objets se limitent assez nettement et les pénombres ne font qu'en adoucir les contours : les ombres cependant sont loin d'être obscures, à moins qu'il ne s'agisse d'un endroit clos de toutes parts; la lumière se reflète dans toutes les directions, soit par l'illumination de l'air lui-même, soit par les parties éclairées des objets qui jouent pour les parties obscures le rôle de sources secondaires de lumière. Mais si la lumière est diffuse, comme

est celle du jour lorsque le Soleil est masqué par des nuages ou des brouillards, l'illumination se répand et s'égalise, au point qu'il est le plus souvent impossible de faire la séparation des lumières et des ombres. L'application géométrique de la théorie des ombres et pénombres, qui peut, dans les arts du dessin, servir aux artistes dans le premier cas, devient

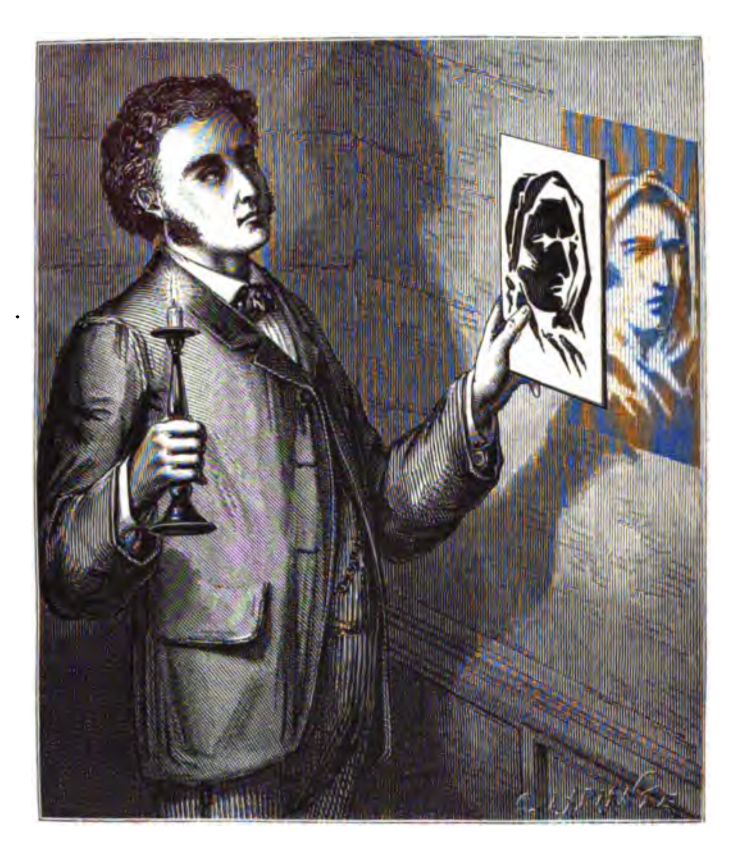


Fig. 15. — Effets d'ombre et de pénombre. Silhouettes des cartes découpées.

impossible dans le second. L'observation ou l'imitation empirique de ces effets est alors la seule ressource praticable.

Les cartes découpées qu'on donne en jouet aux enfants, sont une application de l'effet de clair-obscur produit par les pénombres : le papier s'y trouve découpé et enlevé sur toutes les parties qui doivent paraître en pleine lumière et un peu au delà, de façon que leurs contours soient adoucis par l'effet

de la pénombre. Quand la carte est très voisine du mur ou de l'écran sur lequel l'ombre se projette, cette ombre est tranchée, dure, et l'effet que l'artiste s'est proposé de rendre n'est pas obtenu; mais à une distance convenable les pénombres, plus étendues, produisent l'effet voulu (fig. 15); enfin, si cette distance est trop grande, les pénombres envahissent les parties claires et l'image devient tout à fait confuse.

§ 3. LA CHAMBRE OBSCURE. — IMAGES RENVERSÉES ET COLORÉES DES OBJETS EXTÉRIEURS.

La propagation de la lumière en ligne droite donne l'explication des phénomènes qu'on observe dans la chambre obscure.

Enfermez-vous dans une chambre dont la fenêtre est hermétiquement close; un très petit trou est pratiqué dans une portion très mince du volet, et c'est par ce trou seul que les rayons d'un corps lumineux, ceux du Soleil par exemple, peuvent pénétrer dans la chambre. Placez alors un écran blanc à une certaine distance du trou. Vous verrez une tache lumineuse de forme circulaire ou elliptique, d'autant plus grande que la distance de l'écran à l'ouverture est elle-même plus considérable (fig. 7). C'est l'image du Soleil.

Si, au lieu de la lumière solaire, c'est celle d'une bougie qui pénètre dans la chambre noire, vous verrez, reproduite sur l'écran, l'image de la bougie et de sa flamme, mais l'image est renversée (fig. 16). La raison de ce renversement est fort simple. Les rayons qui partent de l'extrémité supérieure de la flamme passent par le trou, continuent leur route en ligne droite dans la chambre obscure et donnent un point lumineux à la partie inférieure de l'écran. Ceux, au contraire, qui partent de la base de la flamme vont former leur image en un point plus élevé : les rayons intermédiaires donnent des traces lumineuses entre ces deux points. L'image est donc tout naturellement renversée, et l'on s'explique ainsi à la fois pourquoi cette image existe, et pourquoi elle offre cette disposition particulière.

Une carte percée d'un trou très fin, à l'aide d'une aiguille par exemple, donne pareillement sur un écran l'image renversée de la bougie (fig. 15). La forme de l'ouverture est d'ailleurs indifférente : ronde, carrée ou triangulaire, elle donne toujours l'image de la source avec sa forme rigoureusement semblable. Supposons en effet l'ouverture du volet de la chambre obscure de forme triangulaire ; laissons-y pénétrer les rayons du Soleil et recevons-les sur un écran placé normalement à leur direction. Chaque point du disque lumineux donnera un pinceau



Fig. 16. — Image renversée d'une bougie.

de lumière, qui, pénétrant par le trou sous la forme d'une pyramide, sera coupé sur l'écran selon une section de même forme que l'ouverture, c'est-à-dire triangulaire. L'image totale du Soleil sera donc formée d'un nombre indéfini de triangles lumineux. Tous ces éléments se superposeront, et comme il n'est pas un point du contour du disque qui ne donne le sien, il en résulte que la forme de l'image sera rigoureusement celle du Soleil : ce serait une ellipse, si l'écran était placé obliquement à la direction des rayons de lumière.

Cela explique pourquoi dans l'ombre projetée par un arbre

la lumière qui pénètre dans les intervalles laissés par les feuilles a toujours une forme circulaire ou elliptique (fig. 17), suivant que les rayons tombent perpendiculairement ou obliquement sur le sol. Pendant les éclipses de Soleil, on peut observer que les images de l'astre affectent la forme d'un croissant lumineux, d'autant plus échancré que le disque solaire l'est lui-



Fig. 17. — Images rondes et elliptiques du Soleil à travers les ouvertures du feuillage.

même davantage : l'image est annulaire dans le cas d'une éclipse annulaire de Soleil.

Si le volet de la chambre obscure est en face d'un paysage éclairé par le Soleil, ou même par la lumière diffuse que réfléchit un ciel clair, chaque objet viendra peindre son image sur l'écran, image renversée comme on l'a vu tout à l'heure, et l'on aura une reproduction fidèle du paysage. Si l'écran est bien blanc, toutes les couleurs et leurs nuances s'y trouveront

admirablement peintes; mais l'image aura d'autant plus de netteté que l'ouverture sera plus petite et le paysage plus éloigné.

Avant d'aller plus loin, et pour faciliter le langage, disons ce qu'on doit entendre par rayon de lumière, pinceau ou faisceau lumineux. On nomme *rayon lumineux* la série des points considérés simultanément ou successivement, dont l'une quelconque des lignes suivies par la lumière se compose; *pinceau*



Fig. 18. — Images produites à l'intérieur de la chambre obscure.

lumineux, l'ensemble d'un petit nombre de rayons partis du même point, et *faisceau lumineux* la réunion de plusieurs rayons parallèles. Les pinceaux lumineux ne sont autre chose, on le voit, que des pyramides ou des cônes ayant leurs sommets en un point de la source. Mais quand la source lumineuse est très éloignée, comme il arrive pour le Soleil et les étoiles, les rayons partis d'un même point de la source ont une divergence si faible, qu'on peut les considérer comme rigoureusement parallèles.

CHAPITRE III

VITESSE DE PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

§ 1. PREMIERS ESSAIS. — MÉTHODE DE RŒMER : VITESSE DE LA LUMIÈRE MESURÉE PAR LES ÉCLIPSES DES SATELLITES DE JUPITER.

Les Anciens ne croyaient pas que la lumière mette un temps quelconque, si petit qu'il soit, à se transmettre de la source au corps qu'elle éclaire, du point lumineux à l'œil. Cette transmission était, pour eux, instantanée.

Bacon est le premier, parmi les modernes, qui ait émis l'hypothèse que la vitesse de propagation de la lumière n'est pas infinie, et Galilée le premier qui ait essayé de déterminer cette vitesse par l'expérience. Voici comment ce dernier opérait : Deux observateurs, munis chacun d'une lampe, se postaient la nuit à une distance de 2000 mètres environ. Il était convenu que l'un d'eux masquerait sa lumière par un écran, que l'autre en ferait autant pour la sienne, au moment précis où il verrait la première lumière disparaître (fig. 19). Il est clair que si le premier observateur avait pu noter un intervalle de temps mesurable entre l'instant où il couvrait sa lampe et l'instant où il s'apercevait de la disparition de la seconde, cet intervalle eût été double du temps que la lumière met à parcourir la distance qui

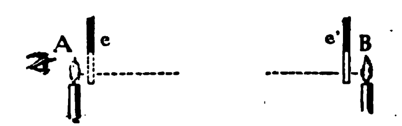


Fig. 19. — Expériences de Galilée. Premier essai de mesure de la vitesse de la lumière.

séparait en ligne droite les deux stations. Or il ne leur fut pas possible de reconnaître, de saisir aucune différence de temps entre les deux phénomènes : les deux lumières parurent toujours s'éteindre au même instant. Répétées par des physiciens de l'Académie del Cimento pour des distances triples de la première, les expériences imaginées par Galilée restèrent infructueuses.

Descartes, qui avait, sur la nature de la lumière, des idées toutes particulières, pensait que sa transmission est absolument instantanée. Considérant les sources lumineuses comme le siège d'une agitation qui se transmettait à distance par l'intermédiaire de corpuscules durs et contigus, il comparait le mouvement de la lumière à celui d'un bâton dont l'une des extrémités se meut au même moment que l'on pousse ou que l'on tire l'autre[1]. Pour lui, la vitesse de la lumière était donc infinie. Il croyait trouver la confirmation de ses idées à ce sujet dans un phénomène astronomique où l'influence de la propagation successive de la lumière aurait dû se faire sentir si elle était réelle. Ce phénomène est celui des éclipses de Lune.

On sait qu'il y a éclipse de Lune, lorsque, à l'époque de l'opposition ou de la pleine Lune, les centres des trois astres se trouvent en ligne droite. En d'autres termes, les longitudes du Soleil et de la Lune doivent à ce moment différer de 180 degrés, comme l'indique la figure 20. Mais si la lumière met un temps t à franchir la distance TL, l'observateur ne verra la Lune en opposition que t secondes après son passage véritable en L. Elle sera donc déjà en L', et Descartes en concluait que, de la Terre, on verrait la Lune éclipsée en un point du ciel qui ne serait plus diamétralement opposé au Soleil. Comme l'observation ne permettait de constater rien de pareil, il en concluait que la lumière a une vitesse infinie ou se transmet instantanément.

1. Il est bon de faire remarquer que le fait même de l'instantanéité du mouvement du bâton à l'un et à l'autre de ses bouts, fait qui sert à Descartes de terme de comparaison, n'est point exact. Dès que le corps solide qu'on soumet à une pression ou à une traction, a une longueur suffisante, on constate que le mouvement met un temps fort appréciable à se propager d'une extrémité à l'autre.

Huygens répondit à cet argument de Descartes en faisant remarquer que la distance de la Lune à la Terre est trop petite pour que le retard du commencement ou de la fin d'une éclipse soit appréciable avec nos moyens d'observation. Mais il faut ajouter, avec tout le respect dû à de grands noms et aux savants qui ont reproduit l'objection et la réponse, que ni l'une ni l'autre ne sont fondées. En effet, dans le phénomène des éclipses, comme dans tous les autres phénomènes lunaires, la transmission successive de la lumière n'intervient pas, comme le pensait Descartes; elle est cause seulement d'un retard (constant pour une même distance) dans l'observation du phénomène; mais ce dernier apparaît toujours dans la direction vraie où il a eu lieu, si l'on considère la Terre comme immobile; et si elle est mobile, la déviation (qui est l'aberration) dépend de la vitesse de la Terre, non de la distance de l'objet observé.

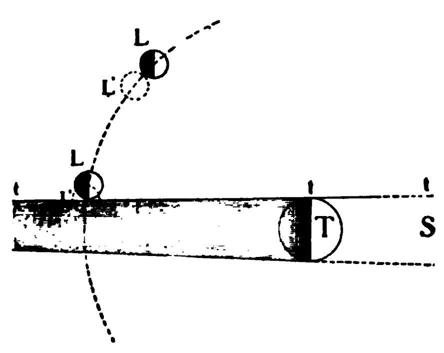


Fig. 20. — Positions relatives du Soleil, de la Terre et de la Lune au moment d'une éclipse.

La question en était là encore, c'est-à-dire indécise, en 1675, quand un astronome danois Rœmer, appelé à l'Observatoire de Paris par Picard, eut l'occasion de comparer entre elles de nombreuses observations des satellites de Jupiter. Il fut frappé, en examinant et en discutant les éclipses du premier satellite, c'est-à-dire du plus rapproché de la planète, de trouver des différences entre les intervalles séparant ces éclipses successives, différences qui étaient tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, et ne pouvaient s'expliquer d'ailleurs par aucune inégalité du mouvement du satellite. Rœmer vit aussitôt que la cause de ces apparentes anomalies provenait du changement de distance entre la Terre et Jupiter, et du temps que la lumière mettait à parcourir ces distances inégales. Voici en quels termes la découverte de l'astro-

nome danois est racontée dans l'*Histoire de l'Académie de* 1676 :

« Les révolutions du premier satellite de Jupiter étant très exactement calculées, et en très grand nombre, et par conséquent toutes ses éclipses causées par l'ombre de Jupiter, il se trouvait toujours qu'en certains temps il sortait de l'ombre quelques minutes plus tard, et dans d'autres plus tôt qu'il n'aurait dû faire, et l'on ne voyait aucun principe de cette variation. En comparant ces temps les uns aux autres, M. Rœmer vit que le satellite sortait plus tard de l'ombre justement quand la Terre par son mouvement annuel s'éloignait de Jupiter, et plus tôt quand elle s'en approchait. De là M. Rœmer commença à former cette conjecture ingénieuse que la lumière pouvait employer quelque temps à se répandre. Cela supposé, si le satellite sortait plus tard de l'ombre quand nous étions plus éloignés de lui, ce n'était pas qu'il en sortît effectivement plus tard ; mais sa lumière était plus de temps à venir jusqu'à nous, parce que, pour ainsi dire, nous avions fui devant elle. Au contraire, quand nous allions à sa rencontre, le séjour du satellite dans l'ombre nous devait paraître plus court.

« Pour éprouver la vérité de cette pensée, il calcula quelle différence dans les sorties de l'ombre, ou émersions du satellite, répondait aux divers éloignements de la Terre, et il trouva que la lumière retardait de onze minutes pour une différence d'éloignement égale à la distance de la Terre au Soleil. »

Nous dirons tout à l'heure quelle valeur résulte, pour la vitesse de la lumière, de la méthode que la découverte de Rœmer a inaugurée, lorsqu'on introduit dans les données du problème les éléments plus précis de l'astronomie contemporaine. Auparavant, revenons sur la méthode même avec quelque détail, et essayons d'en faire clairement comprendre le principe.

Imaginons qu'un phénomène lumineux, l'inflammation d'un tas de poudre par exemple, se reproduise périodiquement à des intervalles de temps parfaitement égaux, de 10 en 10 minutes. Quelle que soit la distance de l'observateur à l'endroit où a

lieu le phénomène, il est évident qu'à partir de la première explosion toutes les autres se succèderont pour lui à des intervalles successifs de 10 minutes, que la vitesse de la lumière soit faible, considérable ou infinie, pourvu que l'observateur reste à une distance constante du point où se font les explosions.

Mais si l'observateur s'éloigne à partir de l'instant où il a vu la première explosion, il est évident qu'il constatera un retard à chacune des explosions suivantes, retard qui ira en augmentant et qui sera dû au temps que la lumière met à parcourir le chemin marquant l'accroissement de la distance. A la douzième explosion, par exemple, s'il s'est éloigné de 20 kilomètres, et qu'il ait constaté un retard de 2 secondes, ne devrait-il pas en conclure que la lumière franchit 10 kilomètres par seconde? La même conséquence devrait être tirée d'une expérience analogue, si, au lieu de l'apparition d'un point lumineux, c'était la disparition périodique d'une lumière qui fût l'objet de l'observation.

Or un phénomène de ce dernier genre a lieu dans le ciel. La planète Jupiter est accompagnée, dans son mouvement de translation autour du Soleil, de quatre satellites qui circulent autour d'elle dans des périodes régulières. Les plans dans lesquels s'effectuent les mouvements de ces petits corps coïncident, à peu de chose près, avec le plan de l'orbite de Jupiter. Or, Jupiter étant opaque, projette derrière lui, c'est-à-dire à l'opposé du Soleil, un cône d'ombre dont l'axe est couché sur le plan de son orbite. Il en résulte que, dans leurs révolutions successives autour de la planète centrale, les satellites viennent traverser ce cône à l'époque de leurs oppositions. Pendant toute la durée du trajet dans l'ombre, la lumière que ces corps recevaient du Soleil est interceptée : ils subissent une éclipse.

Les éclipses des satellites de Jupiter, surtout celles des trois satellites les plus voisins de la planète, sont très fréquentes; et, de la Terre, il est aisé d'observer leurs émersions et leurs immersions en s'aidant d'une lunette de moyenne puissance. Quand le point lumineux, entraîné par son mouvement de révolution autour de la planète, vient à pénétrer dans le cône

d'ombre, sa lumière s'éteint : c'est l'instant d'une *immersion*. Il continue alors sa course dans l'ombre jusqu'au moment où, sortant du cône, sa lumière reparaît : c'est le moment de l'*émersion*. Ces deux phénomènes ne sont pas visibles de la Terre,

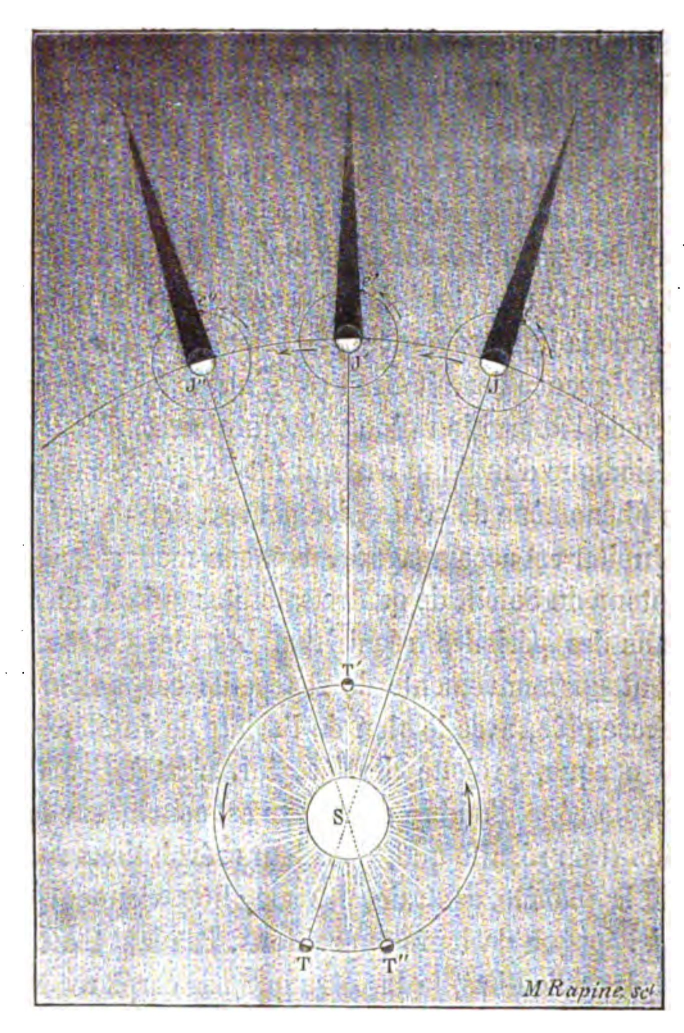


Fig. 21. — Mesure de la vitesse de la lumière par les éclipses des satellites de Jupiter.

pendant la même éclipse ; pour les deux satellites les plus voisins de Jupiter, ces satellites se trouvant masqués par le corps opaque de la planète tantôt au moment de leur immersion, tantôt au moment de leur émersion. De plus, on ne peut les observer d'aucune façon à l'époque de la conjonction ou à celle

de l'opposition, le cône d'ombre se trouvant alors entièrement caché par le disque de la planète, ainsi qu'on peut aisément s'en rendre compte à l'aide de la figure 21. Il est tout aussi facile de voir pourquoi ce sont les immersions qui sont visibles pour nous, depuis l'époque de la conjonction jusqu'à l'opposition suivante, tandis que les émersions au contraire sont visibles de l'opposition à la conjonction.

Jupiter, en effet, se meut dans le même sens que la Terre, mais beaucoup plus lentement qu'elle dans son orbite. Quand la Terre est en T et que Jupiter est en J, sur le prolongement du rayon vecteur TS, c'est l'époque de la conjonction. A partir de cet instant, la Terre décrivant un certain arc sur son orbite, et Jupiter un arc de moindre amplitude sur la sienne, l'observateur se trouve porté à la droite du cône d'ombre de Jupiter et dès lors peut voir les immersions des satellites. Les mêmes circonstances ont lieu jusqu'à l'instant où, la Terre étant en T', Jupiter est en J', toujours sur le prolongement du rayon, mais à l'opposé du Soleil, c'est-à-dire jusqu'à l'opposition. Alors, par le fait des mouvements simultanés de la Terre et de Jupiter, la première de ces planètes se porte à gauche du cône d'ombre projeté par la seconde, et ce sont les émersions des satellites qui sont visibles, jusqu'à la nouvelle conjonction T″ J″.

Ces préliminaires bien compris, nous allons pouvoir facilement expliquer comment les astronomes ont pu déduire la vitesse de la lumière des observations des éclipses dont nous venons de parler.

Considérons, par exemple, le premier satellite de Jupiter, c'est-à-dire le plus voisin de la planète[1]. Son mouvement de

1. Il y a plusieurs raisons qui ont fait choisir de préférence le premier satellite. Les éléments de son orbite, qui est presque circulaire, sont connus avec plus de précision : le plan coïncide à peu de chose près avec le plan de l'orbite de Jupiter, de sorte que les éclipses ont lieu à chaque révolution ; elles sont donc très fréquentes, puisque la durée de la révolution du satellite n'est guère que de 1 jour 3/4. Sa moyenne distance au centre de Jupiter est égale à six fois seulement le rayon de la planète : à cette distance la pénombre qui accompagne le cône d'ombre est presque insensible, de sorte que l'éclipse du point lumineux se fait plus brusquement, avec plus de netteté, et qu'ainsi l'observation de l'instant de la disparition ou de l'émersion est elle-même plus précise.

révolution est connu avec assez de précision pour que l'on puisse calculer avec une grande exactitude les intervalles de ses éclipses, c'est-à-dire les intervalles qui séparent soit deux immersions, soit deux émersions consécutives. Or l'observation a fait voir à Rœmer et à tous les observateurs qui sont venus après lui, que les durées de ces intervalles ne sont pas constantes; qu'elles semblent se raccourcir à mesure que la Terre se rapproche de Jupiter, pour s'agrandir au contraire à mesure qu'elle s'en éloigne, tandis qu'elles restent sensiblement égales aux deux époques où la distance de la Terre à Jupiter varie peu, c'est-à-dire soit vers la conjonction, soit vers l'opposition. Si donc on calcule, d'après la durée moyenne des intervalles séparant deux immersions successives, l'époque d'une future immersion, et que l'on compare le résultat du calcul avec celui donné par l'observation, on trouvera que le phénomène semble en retard si la Terre s'est éloignée de Jupiter, qu'il paraît au contraire en avance si elle s'en est rapprochée. De plus, le retard ou l'avance se trouve toujours en proportion exacte avec l'augmentation ou avec la diminution de distance des deux planètes.

Il n'est donc pas douteux que la différence entre le résultat du calcul et celui de l'observation ne provienne du temps que met la lumière à parcourir les distances inégales dont nous venons de parler.

Delambre, par la discussion de plus de 1000 éclipses des satellites de Jupiter, a trouvé que, de la conjonction à l'opposition ou de l'opposition à la conjonction, les accumulations successives de ces différences produisaient une avance ou un retard total d'environ 16 minutes 26^s,5[1]. Or les distances TJ, T″J″ surpassent la distance T′J′ d'une même quantité, qui est précisément le diamètre de l'orbite terrestre. Il faut donc 16 minutes

1. Rœmer avait trouvé 11 minutes pour le temps que met la lumière à franchir le diamètre de l'orbite terrestre. D'autres savants calculèrent des nombres encore plus forts : Duhamel 15^m, Horrebow 14^m 7^s, Cassini 14^m 10^s. Newton trouva 7^m 30^s, et enfin Delambre, comme on l'a vu plus haut, arriva au chiffre de 8^m 13^s, ou plus exactement 493^s,243.

26 secondes à la lumière pour franchir la longueur de ce diamètre, ou 8 minutes 13 secondes (493^s,243) pour parcourir sa moitié, qui est la distance du Soleil à la Terre.

Cela posé, si l'on divise le nombre qui mesure la distance moyenne de la Terre au Soleil par 493,243, on aura la vitesse de la lumière, c'est-à-dire le nombre de kilomètres qu'elle franchit en une seconde de temps moyen : $V = \frac{D}{t}$.

Du temps de Rœmer, la distance du Soleil n'avait pu encore être calculée qu'avec une approximation bien insuffisante, et on a vu que le nombre t n'était pas non plus connu avec exactitude, en sorte que la vitesse réelle de la lumière ne pouvait être que très grossièrement évaluée. Les travaux de Delambre ont fait connaître t avec une certaine précision qui n'a point été dépassée depuis ; quant à la distance ou à la parallaxe du Soleil, les passages de Vénus de 1761 et de 1769 ont permis de la calculer avec une approximation bien supérieure aux évaluations antérieures. Nous donnerons plus loin les valeurs diverses qui résulteraient, pour la vitesse de la lumière déterminée d'après cette première méthode, de l'adoption de telle ou telle valeur de la parallaxe solaire.

Ce qu'il faut retenir de la découverte de Rœmer, c'est qu'elle a mis en pleine évidence le fait de la propagation successive de la lumière dans les espaces interplanétaires, et qu'elle a rendu possible, pour la première fois, la détermination numérique de la vitesse avec laquelle s'effectue cette propagation. Mais elle renferme diverses causes d'incertitude : l'une d'elles consiste dans la difficulté qu'ont les observateurs de noter avec précision l'instant où a lieu la disparition du satellite. Cette disparition n'est pas instantanée, puisque c'est un corps de dimensions finies, un disque lumineux qui est peu à peu immergé dans le cône d'ombre, et, suivant qu'on observe le phénomène à l'aide de lunettes plus ou moins puissantes, la complète disparition du point lumineux se trouve plus ou moins retardée ; même remarque, en sens inverse, pour les observations des

émersions des satellites. Une seconde cause d'incertitude, celle-là plus importante, est celle qui provient de la valeur qu'on adopte pour la parallaxe solaire.

§ 2. L'ABERRATION. — VITESSE DE LA LUMIÈRE COMPARÉE A CELLE DE LA TERRE.

En 1675, Rœmer trouvait qu'il faut un certain temps à la lumière pour se transmettre à distance et calculait approximativement, sinon la vitesse absolue de cette transmission, du moins celle avec laquelle un rayon lumineux franchit de part en part le diamètre de l'orbite terrestre. Cinquante ans après cette découverte mémorable, c'est-à-dire en 1725, un astronome anglais, Bradley, trouvait dans un phénomène céleste beaucoup plus général que des éclipses de satellites la confirmation des résultats obtenus par Rœmer. L'*aberration* est en effet une conséquence immédiate de la vitesse de la lumière combinée avec la vitesse de translation de la Terre autour du Soleil.

Pas plus que Rœmer, en abordant l'étude des éclipses des satellites de Jupiter, ne songeait au problème de la transmission de la lumière, Bradley n'avait en vue, quand il entreprit de mesurer les petits déplacements de quelques étoiles zénithales, l'importante conséquence qu'il tira de ses observations. Il s'agissait pour lui de savoir si ces étoiles avaient une parallaxe sensible, c'est-à-dire si, par le seul fait de la translation annuelle de la Terre, elles éprouvent le changement de position apparente qu'indique la géométrie, et qui est en dépendance immédiate du mouvement de la Terre et de la distance de l'étoile à notre système. Profitant de l'installation récente, faite à l'observatoire de Kew par Molyneux, d'un excellent instrument construit par Graham pour ce but spécial, Bradley observa l'étoile γ de la constellation du Dragon pendant le mois de décembre 1725. Il reconnut bientôt que cette étoile avait un mouvement vers

le Sud, mouvement dont les erreurs instrumentales et l'incertitude des observations ne pouvaient donner l'explication. D'ailleurs ce mouvement était précisément en sens contraire de celui qu'aurait dû donner la parallaxe. Il continua jusqu'en mars, où il atteignit 20", quantité dont l'étoile s'était éloignée du pôle pendant ces trois mois. L'étoile reprit alors sa marche vers le Nord et, en juin, elle se retrouva au point de départ de décembre. En septembre, elle était de 20" plus au Nord, puis elle revint vers le Sud pour reprendre une seconde fois en décembre sa position primitive. Ni l'hypothèse d'une nutation de l'axe de la Terre, ni la réfraction atmosphérique ne permirent à Bradley d'expliquer ces oscillations. Enfin, il eut l'idée de chercher si de tels mouvements ne seraient pas dus à la vitesse avec laquelle les rayons de lumière viennent frapper l'observateur, qui est lui-même transporté dans l'espace par le globe sur lequel il est placé, avec une vitesse à la vérité beaucoup moindre que celle des rayons lumineux. Telle est en effet la vraie raison du phénomène découvert par Bradley, phénomène qu'il reconnut bientôt être commun à toutes les étoiles, et que l'illustre savant anglais nomma *aberration*.

Voyons en effet ce qui se passe quand un rayon de lumière pénètre dans le tube de l'instrument qui sert à observer l'étoile considérée, si l'on tient compte, à la fois, de la vitesse de la lumière et de la vitesse de la Terre.

Soit BT la position de l'axe de la lunette au moment où l'œil de l'observateur vise l'astre. Cet axe indique la direction apparente des rayons lumineux, de sorte que l'étoile est vue en *e* sur la voûte céleste. Pendant que le rayon lumineux a parcouru la longueur BT, la Terre s'est elle-même déplacée de B en C, et, avec elle, la lunette aussi bien que l'œil de l'observateur. La véritable route suivie par le rayon est la ligne TC, qui dès lors représente la vraie direction des rayons émanés de l'étoile. La position réelle de cette dernière sur la voûte céleste est donc en E; c'est là que serait vue l'étoile, si la Terre était immobile. En un mot, la direction apparente n'est autre chose que la

direction de la résultante des deux mouvements de la lumière d'une part, de la Terre de l'autre; c'est la diagonale du parallélogramme formé par deux lignes proportionnelles aux deux vitesses, et menées dans les directions des deux mouvements. Ainsi les vitesses simultanées de la lumière et de la Terre doivent causer et causent en effet une déviation dans la direction des rayons lumineux émanés d'un point qui ne participe pas au mouvement de notre globe. C'est cette déviation, cet angle ET*e*, qui constitue l'aberration, et que Bradley a mise en évidence par l'observation des étoiles zénithales. La vitesse de la lumière est constante; celle de la Terre ne varie que dans de faibles limites. Les deux côtés BC et CT du triangle ne changent donc pas, mais il n'en est pas de même de l'angle qu'ils forment entre eux, à moins qu'on ne considère une étoile située au pôle de l'écliptique ou à peu de distance de ce pôle. Une semblable étoile E (fig. 23) sera vue en *e* quand la Terre est en T sur son orbite, en *e′*, *e″*, *e‴* quand elle occupe successivement les positions T′, T″, T‴. En un mot l'étoile est toujours en avant de sa position réelle de l'angle d'aberration, de sorte qu'en un an elle semble décrire un cercle parallèle à l'orbite terrestre, avec cette particularité que l'étoile est toujours en avance de 90° sur la Terre. L'angle d'aberration maximum est d'un peu plus de 20″. Les dernières mesures,

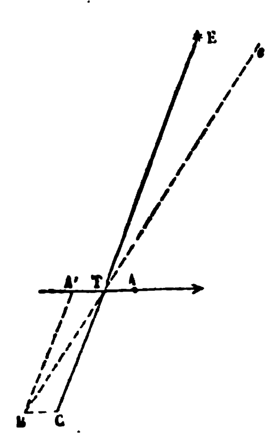


Fig. 22. — Phénomène de l'aberration. Composition des vitesses de la lumière et de la Terre.

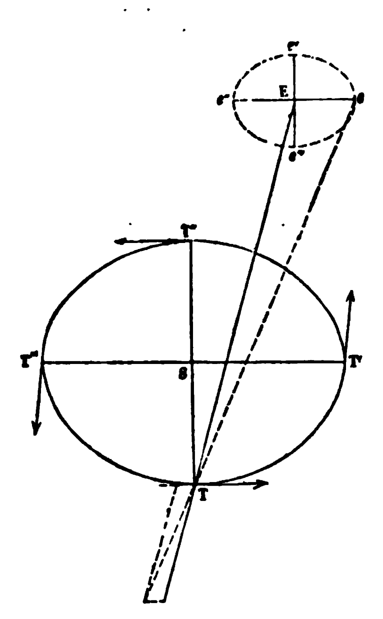


Fig. 23. — Aberration annuelle.

dues à Otto Struve, donnent 20″,445, de sorte que le diamètre du cercle est de 40″,89. Pour des étoiles situées hors du pôle de l'écliptique, on trouve qu'elles décrivent annuellement des ellipses dont le grand axe, parallèle à l'écliptique, mesure aussi 40″,89, et dont le petit axe diminue avec la latitude de l'étoile. Sur le plan de l'écliptique, ces ellipses se réduisent à des lignes droites, et quand la Terre se trouve à l'une ou à l'autre extrémité du diamètre qui aboutit à l'étoile, l'angle d'aberration est nul. Cela se conçoit : alors la direction du mouvement de la Terre est précisément opposée à celle des rayons lumineux, ou bien elle coïncide avec cette dernière.

Pour bien faire comprendre le phénomène de l'aberration de la lumière et sa cause, nous allons montrer l'analogie qui existe entre ce phénomène et des faits qu'on peut aisément observer à la surface de la Terre.

Considérons un navire qui se meut dans la direction AB avec une vitesse déterminée. De la côte, une batterie lui envoie un boulet qui vient frapper en *a* son bordage et continue sa route sans que le premier choc ait changé sa direction, *ab*. Si le navire était immobile, le boulet percerait en *b* le bordage opposé, et la ligne *ab* qui joindrait les deux ouvertures pratiquées par le projectile marquerait précisément la direction du tir, celle de la bouche à feu ; mais, pendant que le boulet parcourt *ab*, ou traverse le navire, ce dernier s'est avancé de AB en A_1B_1 : le point qui eût été frappé dans l'hypothèse du navire immobile, s'est avancé en *b′*, et le boulet perce un point du bordage en arrière du

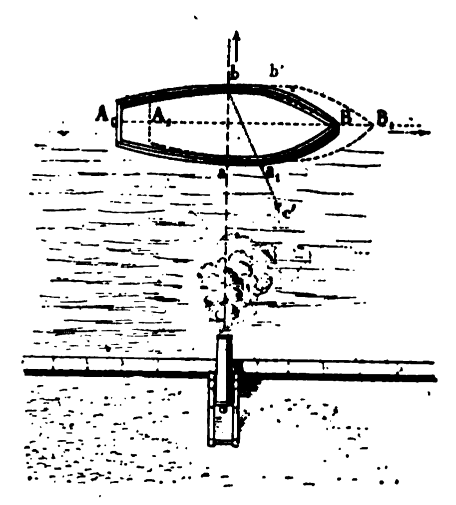


Fig. 24. — Déviation apparente d'un projectile qui frappe un navire en marche.

premier de la distance *bb'*. Au lieu de la direction *ba* qui est la direction vraie, l'observateur, situé sur le vaisseau, jugera de la direction du coup par la ligne ba_1 et le boulet lui semblera provenir du point *c'*. La déviation aba_1 est due à la combinaison des vitesses du projectile et du navire : c'est un effet d'aberration. Si le boulet fût venu par l'avant ou par l'arrière du navire, dans la direction même de sa marche, la déviation serait évidemment nulle.

Un phénomène du même genre peut s'observer en wagon quand on examine la direction des gouttes en cas de pluie. Supposons, pour plus de simplicité, que la pluie tombe verticalement. Si le wagon est en repos, le voyageur verra de l'intérieur

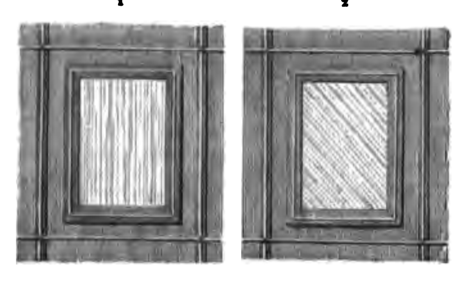


Fig. 25. — Déviation apparente des gouttes de pluie : 1, wagon immobile ; 2, wagon en marche.

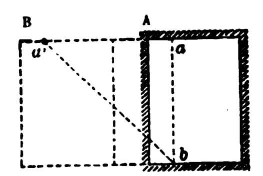


Fig. 26. — Déviation apparente des gouttes de pluie. Explication.

les gouttes tomber dans une direction parallèle à celle des bords de la portière, comme elle l'est en effet. Mais le convoi se met-il en marche, aussitôt l'apparence change : la pluie paraît tomber obliquement, comme si elle était chassée par un vent venant du point de l'horizon vers lequel marche le train, et l'obliquité des gouttes sera d'autant plus forte que la vitesse sera plus grande. On comprend aisément qu'une goutte *a*, qui serait tombée suivant *ab* parallèlement au côté de la portière, tombe bien en effet dans l'espace suivant cette ligne ; mais quand elle arrive au bas de sa course, le wagon et la portière elle-même se sont avancés de AB et la goutte tombe au point *b* de cette dernière : elle a semblé au voyageur suivre la ligne *a'b*.

Un piéton qui resterait immobile, protégé par un parapluie

contre une pluie tombant verticalement, ne recevrait pas une goutte; qu'il se mette à courir dans une direction quelconque, il se trouvera atteint et croira recevoir la pluie obliquement, précisément en sens opposé à celui de la direction qu'il suit en courant. Si l'on suppose qu'il parcourt ainsi toute une circonférence de cercle, la pluie lui fouettera le visage comme si elle venait successivement de tous les points de l'horizon. C'est un phénomène de tous points analogue à celui de l'aberration de la lumière, et dont les maximums et les minimums varieraient de même, si l'on supposait que la pluie, au lieu de tomber verticalement, prenait en réalité toutes les directions possibles d'obliquité à l'horizon. La Terre reçoit en tout temps, dans toutes les directions, des rayons de lumière émanés de toutes les parties de la voûte étoilée; c'est une pluie continue de molécules, ou, si l'on préfère, d'ondes lumineuses.



Fig. 27. — Phénomène analogue à l'aberration.

L'aberration est un phénomène commun à tous les astres, étoiles, soleil, planètes. Les astronomes, pour connaître la position vraie de ces corps, doivent donc, entre autres corrections, tenir compte des altérations qui en résultent pour les coordonnées auxquelles ils ont coutume de rapporter ces positions, ascensions droites et déclinaisons, longitudes et latitudes.

Puisque l'aberration dépend à la fois de la vitesse de la lumière et de celle de l'observateur, c'est-à-dire du globe où il se tient, il en résulte qu'outre l'aberration relative au mouvement de

translation de la Terre, il y a aussi une déviation analogue due au mouvement de rotation. Mais ce mouvement est beaucoup moins rapide que le premier, puisque à l'équateur, où sa vitesse est maximum, elle ne dépasse pas, elle n'atteint même pas 500 mètres par seconde, c'est-à-dire qu'elle n'est guère que la 650 000e partie de la vitesse de la lumière. Aussi l'angle maximum d'aberration diurne ne dépasse guère trois dixièmes de seconde; on le considère comme négligeable.

Enfin, il y a une troisième cause qui doit nécessairement intervenir dans le phénomène de l'aberration pour en modifier la valeur, et qui ne paraît pas négligeable. Les astronomes ont reconnu, en discutant l'ensemble des mouvements propres des étoiles, que le système solaire tout entier se déplace dans l'espace, que le Soleil, entraînant avec lui les planètes, leurs satellites et les comètes du système, est affecté d'un mouvement de progression vers un point du ciel situé dans la constellation d'Hercule. S'il en est ainsi, la Terre, outre la vitesse de ses deux mouvements de rotation et de translation, possède une vitesse de déplacement parallèle au déplacement de tout le système[1]. Dès lors le mouvement absolu d'un observateur situé à sa surface se trouvera en cherchant à chaque instant la résultante de ces trois mouvements. L'aberration d'une étoile, telle qu'elle a été calculée en tenant compte seulement des deux premiers (ou plutôt du seul mouvement de translation, celui de rotation étant négligeable), doit donc varier aux diverses époques de l'année; les valeurs minima ou maxima de ces variations doivent dépendre et de la situation des étoiles et des directions relatives du mouvement de la Terre dans son orbite et du mouvement de translation du système solaire. Il reste à savoir si l'observation confirme ces vues théoriques, dont l'exactitude est évidente. M. Yvon Villarceau, qui les a exposées à

1. D'après les recherches de M. Struve, la vitesse de translation du système solaire dans la direction de la constellation d'Hercule serait égale à 7^{kil},6 environ par seconde. C'est le quart de la vitesse moyenne de la Terre autour du Soleil, et dès lors environ la 40 000e partie de la vitesse de la lumière.

diverses reprises, a appelé sur cette question intéressante l'attention des astronomes.

On a vu que la méthode employée par Rœmer pour mesurer la vitesse de la lumière ne donne point cette vitesse en grandeur absolue. Elle permet seulement de calculer le temps qu'une onde lumineuse met à traverser le rayon de l'orbite de la Terre. Pour en conclure le chemin parcouru en une seconde, il faut connaître ce rayon, il faut avoir mesuré la distance de la Terre au Soleil, ou, si l'on veut, connaître la parallaxe de ce dernier astre. Du temps de Rœmer, cet élément n'était pas mesuré, avec quelque précision du moins; il l'a été depuis, bien qu'il reste encore des incertitudes sur les derniers chiffres qui l'expriment. Mais ce que l'on a pu calculer, c'est le rapport de la vitesse de la lumière à la vitesse de la Terre. On trouve ainsi que la première vitesse est égale à 10 190 fois la seconde.

La mesure de l'angle d'aberration conduit aussi aisément au calcul du même rapport, et, en adoptant le nombre d'Otto Struve, on obtient 10 100 fois la vitesse moyenne de la Terre pour celle de la lumière. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont donc concordants à 1 centième près.

On confond quelquefois avec l'aberration un phénomène de déviation qui en est distinct, puisqu'il provient, non du mouvement de l'observateur, mais au contraire de celui de l'astre observé et de sa distance, tandis que l'aberration est indépendante de la distance de l'astre d'où la lumière est émanée. Voici de quoi il s'agit :

Considérons une planète. Au moment où l'astronome l'observe au foyer de sa lunette, il note une position apparente qui doit être corrigée de l'aberration pour obtenir la position vraie, ou, ce qui est plus exact, pour avoir la direction vraie du rayon lumineux qui en est émané. Mais ce rayon est parti de la planète à une époque antérieure, puisque la lumière a dû mettre un temps déterminé pour franchir la distance qui sépare l'astre de la Terre. Pendant ce temps, la planète, qui a un mouvement

propre, s'est en réalité déplacée sur son orbite, et sa position vraie à l'instant physique de l'observation n'est déjà plus celle que l'observateur enregistre, même après l'avoir corrigée de l'aberration. Pour les diverses planètes, la différence de temps dont nous parlons varie dans des limites assez considérables, puisqu'elle dépend des distances de chaque planète à la Terre; mais elle varie aussi pour la même planète, puisque, dans le cours d'une de ses révolutions synodiques, celle-ci change continuellement aussi de distance. Voici un tableau qui marque les maxima et les minima de ces inégalités. Il renferme encore l'angle d'aberration pour chaque planète, angle qui varie nécessairement d'une planète à l'autre, puisque, la vitesse de la lumière étant constante, la vitesse de l'astre sur son orbite va en décroissant à mesure qu'on s'éloigne du Soleil.

NOMS DES PLANÈTES.	ANGLE D'ABERRATION.	TEMPS QUE MET LA LUMIÈRE A VENIR		
		DE LA PLANÈTE AU SOLEIL.	DE LA PLANÈTE A LA TERRE. 1° à la distance minimum.	2° à la distance maximum.
Mercure	32″	$5^m 11^s$	$4^m 32^s$	$10^m 18^s$
Vénus	23″5	$5^m 57^s$	$2^m 36^s$	$14^m 18^s$
La Terre.	20″445	$8^m 15^s$	»	»
Mars.	14″7	$12^m 34^s$	$3^m 5^s$	$22^m 4^s$
Jupiter.	8″8	$42^m 55^s$	$34^m 15^s$	$53^m 13^s$
Saturne	6″5	$1^h 18^m 42^s$	$1^h 6^m$	$1^h 31^m 34^s$
Uranus.	4″5	$2^h 38^m 15^s$	$2^h 22^m 40^s$	$2^h 53^m 15^s$
Neptune	3″7	$4^h 7^m 57^s$	$3^h 57^m 40^s$	$4^h 22^m 20^s$

§ 3. MESURE DIRECTE DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE. — MÉTHODE DE M. FIZEAU.

Les deux méthodes ci-dessus exposées ne conduisent qu'indirectement à la solution du problème qui a pour objet la mesure de la vitesse absolue de la lumière. L'exactitude du nombre auquel on arrive en employant l'une ou l'autre de ces méthodes, est subordonnée à la connaissance d'un élément

astronomique, la parallaxe du Soleil. Il était donc important de déterminer directement, par des méthodes purement physiques, la vitesse de la lumière, et de vérifier, par la comparaison des résultats obtenus ainsi, le plus ou moins d'exactitude des données astronomiques sur les dimensions de l'orbite terrestre, et par suite sur les dimensions du système solaire. C'est à quoi sont parvenus deux savants français, M. Fizeau d'un côté, M. Léon Foucault de l'autre. Nous allons décrire successivement les procédés employés par ces deux physiciens, les expériences qu'ils ont faites et les résultats auxquels ils sont parvenus.

Commençons par la méthode de M. Fizeau.

Voici quel en est le principe : Imaginons un écran mobile disposé au devant d'une source lumineuse. Si l'on soulève l'écran, la lumière passe et va tomber, à une distance suffisamment grande, sur un miroir plan placé perpendiculairement à la direction suivie par le faisceau lumineux. Le miroir réfléchit ce faisceau, qui revient sur lui-même et franchit une seconde fois, mais en sens inverse, la distance du miroir à la source. Si, pendant l'intervalle de temps que la lumière a mis à franchir la double distance, à aller de la source au miroir, puis à revenir du miroir à la source, l'écran s'est abaissé, la lumière interceptée ne reviendra plus au point de départ. Toute la question est de savoir pendant combien de temps au plus l'écran peut rester soulevé lorsque la condition d'interception est remplie : ce temps sera précisément celui que la lumière a employé pour faire le double chemin de l'écran au miroir.

Voyons par quel artifice M. Fizeau est parvenu à réaliser, à appliquer le principe ainsi résumé. L'appareil dont il s'est servi est représenté, en ce qu'il a d'essentiel, dans la figure 28. Il se compose de deux parties : l'une, à droite de la figure, était placée à la station de départ des rayons lumineux, à Suresnes ; l'autre, celle de gauche, était disposée à la station d'arrivée, à Montmartre.

En L est une lampe qui envoie un faisceau de rayons lumineux dans un système de deux lentilles, disposées dans un tube latéral. Le faisceau est réfléchi par un miroir M formé d'un morceau de glace sans tain, incliné à 45° sur sa route. Il converge, après sa réflexion, en un point qui est précisément le foyer de l'objectif d'une lunette AB; le faisceau est ainsi ramené au parallélisme dans la direction de la ligne des deux stations. Il franchit donc la distance qui les sépare.

Arrivé à Montmartre, le faisceau, après avoir traversé l'objectif d'une seconde lunette, va se concentrer sur un miroir



Fig. 28. — Appareil de M. Fizeau pour la détermination de la vitesse de la lumière.

qui le renvoie, en suivant la même route, sur le premier miroir incliné. Là le faisceau réfléchi, traversant la glace sans tain, peut être examiné par l'observateur muni d'un oculaire. On voit qu'à l'aide de cette disposition M. Fizeau a pu observer à Suresnes l'image de la lumière placée près de lui, après que ses rayons avaient effectué le double trajet qui sépare Suresnes de Montmartre.

Toute la question était de déterminer le temps que met la lumière à franchir ce double intervalle. Pour y parvenir, M. Fizeau plaçait sur la route du faisceau, un peu en avant du miroir M et au point où les rayons émanés de la lampe viennent former leur foyer, les dents d'une roue R, à laquelle un

mécanisme d'horlogerie permettait d'imprimer un mouvement très rapide et uniforme.

Toutes les fois que le mouvement de la roue amène une dent sur la route du faisceau, cette dent fait l'office d'un écran, la lumière est interceptée, tandis qu'elle traverse librement le vide qui sépare une dent de la dent suivante. C'est comme si l'on abaissait et relevait alternativement un écran devant le passage de la lumière. Supposons qu'au début de la rotation la roue, encore immobile, présente un de ses vides au passage de la lumière : l'image réfléchie du point lumineux est vue sans affaiblissement par l'observateur. Si maintenant la roue tourne, mais avec une vitesse telle que chaque

1 2 3

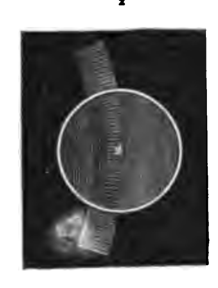




Fig. 29. — Expériences de M. Fizeau : 1, le point lumineux vu à travers les dents de la roue immobile ; 2, éclipse partielle du point lumineux ; 3, éclipse totale.

dent mette, pour venir prendre la place du vide qui la suit, un temps plus long que le temps employé par la lumière pour aller à Montmartre et revenir à Suresnes, qu'arrivera-t-il? C'est que le rayon lumineux à son retour trouvera encore le passage libre, par le vide même qu'il a traversé au moment du départ : le point lumineux sera toujours visible; mais, à mesure que croîtra la vitesse de rotation, l'intensité de la lumière diminuera, parce que, de tous les rayons lumineux qui traversent chacun des intervalles, il y en a un nombre croissant qui, à leur retour, trouveront le passage fermé. Si enfin la vitesse de la roue est telle que le temps employé par une dent pour venir prendre la place du vide qui la précède est précisément égal à celui que met la lumière à franchir

la double distance des deux stations, il n'est pas un seul rayon lumineux traversant la roue au départ qui ne trouve le passage fermé au retour ; il y aura éclipse continue du point lumineux tant que persistera la vitesse dont nous parlons.

Cela suffit, car un compteur adapté à la roue permet alors de connaître le nombre de tours qu'elle fait par seconde ; le nombre des dents et des intervalles est connu : le temps qu'une dent met à prendre la place d'un vide est donc connu lui-même[1], et l'on vient de voir qu'il est rigoureusement égal à celui que met la lumière à parcourir deux fois les 8633 mètres qui séparaient les deux stations.

M. Fizeau a trouvé ainsi que la lumière parcourt 315 000 kilomètres par seconde, résultat qui approche beaucoup de celui que fournissait l'observation des éclipses des satellites de Jupiter, quand on adoptait la distance du Soleil déduite de l'ancienne parallaxe de cet astre.

C'est en 1849 que M. Fizeau a fait les remarquables expériences dont il vient d'être question. Dans ces dernières années, elles ont été reprises par un de nos savants physiciens, M. Cornu, qui, sans modifier en rien la méthode dans son principe, l'a perfectionnée sous divers rapports. Une des difficultés du procédé expérimenté par M. Fizeau était la mesure précise de la vitesse de rotation de la roue dentée au moment de la disparition ou de l'éclipse du point lumineux, comme au moment de

1. Le disque employé par M. Fizeau avait son contour divisé en 1440 parties égales, chacune dès lors d'un quart de degré. Elles étaient évidées de deux en deux, de sorte qu'il y avait en tout 720 dents espacées par des vides de même largeur que les dents.

Le compteur donna une vitesse de 12,67 tours par seconde au moment de la première éclipse du point lumineux. La vitesse de rotation était donc alors telle, qu'une dent venait prendre la place de l'intervalle vide voisin en un temps marqué par la fraction de seconde

$$\frac{1}{1440 \times 12,67} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{18\,244}.$$

Ainsi, pour franchir deux fois l'intervalle compris entre les deux stations (c'est-à-dire $8633^m \times 2$ ou 17 266 mètres), la lumière avait mis la 18 144e partie d'une seconde. Donc sa vitesse dans l'air en une seconde était égale à $17\,266^m \times 18\,244$ ou à 315 000 kilomètres. On verra que ce premier résultat est un peu trop fort.

la réapparition. Il s'était efforcé pour cela de rendre constante, pendant une minute environ, la vitesse qui correspond à ces maxima ou minima de lumière.

M. Cornu, dans ses expériences, a préféré donner à la roue dentée une vitesse croissante ou décroissante suivant une loi régulière, sauf à enregistrer automatiquement la loi de ce mou-

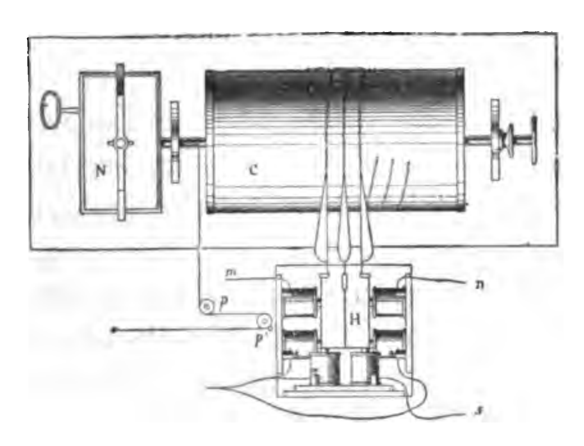


Fig. 30. — Appareil enregistreur de M. Cornu. Expériences sur la vitesse de la lumière : C, cylindre enregistreur; H, chariot portant trois électro-aimants munis de leurs tracelets; N, moteur Foucault à ressort donnant le mouvement à l'enregistreur.

vement par une transmission électrique; une autre transmission permet d'enregistrer aussi les moments précis des apparitions ou disparitions du point lumineux. Sur le cylindre enduit de noir de fumée où se tracent graphiquement les nombres de tours de la roue dentée, une seconde ligne marque les points *ab* correspondants à ces moments, et une troisième enregistre les secondes 0, 2, 4 d'une horloge voisine (fig. 31). De cette façon la mesure de la vitesse de la roue s'obtient par la coïncidence de ces trois tracés indépendants.

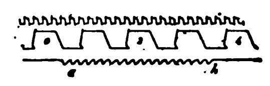


Fig. 31. — Diagramme de l'appareil enregistreur.

Une série de 698 expériences faites en 1873 entre l'École polytechnique et le mont Valérien, sur une distance de 10310 mètres, a donné à M. Cornu, pour la vitesse de la lumière dans le vide, le nombre de 298500 kilomètres par seconde. En 1875,

de nouvelles expériences[1] ont eu lieu entre l'Observatoire et la tour de Montlhéry (distance 23 kilomètres). 504 expériences lui ont donné 300400 kilomètres. Le savant physicien estime que cette valeur est exacte à 0,001 près en plus ou en moins.

§ 4. MESURE DIRECTE DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE. — MÉTHODE DU MIROIR TOURNANT DE LÉON FOUCAULT.

Léon Foucault fit entre 1850 et 1862, à l'aide d'une méthode et d'appareils que nous allons décrire succinctement, des expériences qui permirent à ce physicien de déterminer directement la vitesse de la lumière. Le nombre auquel il parvint ne diffère pas notablement de celui que trouva M. Fizeau. Essayons de donner une idée de la façon dont il a été obtenu.

Wheatstone venait de chercher une limite inférieure de la vitesse de l'électricité par la méthode des miroirs tournants. Arago, après avoir rendu compte des expériences du savant anglais, conçut la pensée de faire servir cette méthode, convenablement modifiée, non pas à mesurer la vitesse absolue de la lumière, mais à comparer cette vitesse dans l'eau et dans l'air. L'importance de cette comparaison était considérable, au point de vue des deux théories de la lumière qui se partageaient encore à cette époque le monde savant. En effet, d'après la

1. Voici quelques détails empruntés à l'auteur sur les conditions dans lesquelles ces dernières expériences ont été effectuées :

« L'expérience a été installée dans des conditions dignes de l'importance du problème à résoudre. La lunette d'émission n'a pas moins de 8^m,855 de distance focale et 0^m,37 d'ouverture. Le mécanisme de la roue dentée permet d'imprimer à celle-ci des vitesses dépassant 1600 tours par seconde ; le chronographe et l'enregistreur électriques assurent la mesure du temps au millième de seconde. M. Bréguet, à qui la construction de ces mécanismes avait été confiée, a apporté à leur exécution le concours dévoué qu'il a toujours prêté à toutes les opérations auxquelles son nom est associé.

« Tous ces appareils sont solidement établis sur la terrasse supérieure de l'Observatoire ; une communication électrique, établissant la correspondance du chronographe avec les battements de la pendule de la salle méridienne, fixe l'unité de temps avec la plus grande précision. A la station opposée, sur le sommet de la tour de Montlhéry, il n'y a qu'un collimateur à réflexion, dont l'objectif a 0^m,15 d'ouverture et 2 mètres de distance focale ; il est enveloppé par un gros tuyau de fonte, scellé à la muraille pour le soustraire à la curiosité des visiteurs. »

théorie de Newton ou de l'*émission*, la lumière devait se propager plus rapidement dans l'eau que dans l'air. Le contraire devait avoir lieu, si la théorie des *ondulations* était la véritable.

Pour décider entre ces deux hypothèses, il s'agissait donc de trouver expérimentalement laquelle des deux vitesses surpassait l'autre. Arago posa le principe de la méthode à employer, décrivit les appareils propres à la mettre en œuvre et chargea même un savant mécanicien, M. Bréguet, de la construction de ces appareils. Mais l'illustre secrétaire de l'Académie des sciences ne put, à cause de l'affaiblissement de sa vue, réaliser son projet. M. Fizeau et M. Léon Foucault, autorisés par Arago à mettre à exécution ses vues, arrivèrent presque en même temps, en modifiant chacun de son côté la disposition des appareils, au résultat prévu; ils trouvèrent que la lumière se meut plus rapidement dans l'air que dans l'eau, ce qui constituait une confirmation nouvelle de la vérité de la théorie des ondes.

Voici comment Foucault disposa ses expériences :

MM (fig. 32) est un miroir plan vertical pouvant tourner autour d'un axe A également vertical. En face se trouve une ouverture de forme rectangulaire *ab*, qui laisse passer les rayons d'une source lumineuse, par exemple les rayons du soleil. Le faisceau lumineux traverse d'abord une glace NN à faces parallèles, puis une lentille achromatique LL et va tomber en A sur l'axe du miroir tournant. Il s'y réfléchit de manière à converger en un point O′, où se forme une image réelle $a''b''$ de l'ouverture. Mais là se trouve un miroir concave dont le centre de courbure est en A sur l'axe du miroir tournant.

Supposons d'abord ce dernier immobile. Le faisceau lumineux tombé en O′ se réfléchit une seconde fois dans la direction O′A de sa route primitive, c'est-à-dire dans la direction du faisceau réfléchi par le miroir MM. Ce dernier n'ayant point changé de position, la seconde réflexion s'y fera selon la direction du faisceau incident; la lentille sera traversée en sens inverse et la lumière sera renvoyée précisément au point O, c'est-à-dire au point de départ. Seulement, une partie du faisceau de retour se réflé-

chira sur la glace NN et viendra former en αβ une image de l'ouverture. Là, l'observateur pourra l'examiner à l'aide d'un oculaire muni d'un réticule fixe qu'on fait coïncider avec l'image.

Faisons maintenant tourner le miroir autour de son axe vertical A. L'image O′ quittera le miroir concave, en décrivant une circonférence à chaque tour, de sorte qu'à chaque tour aussi l'image viendra se former en O′. Si la vitesse de rotation est suffisamment grande, ces images successives ou

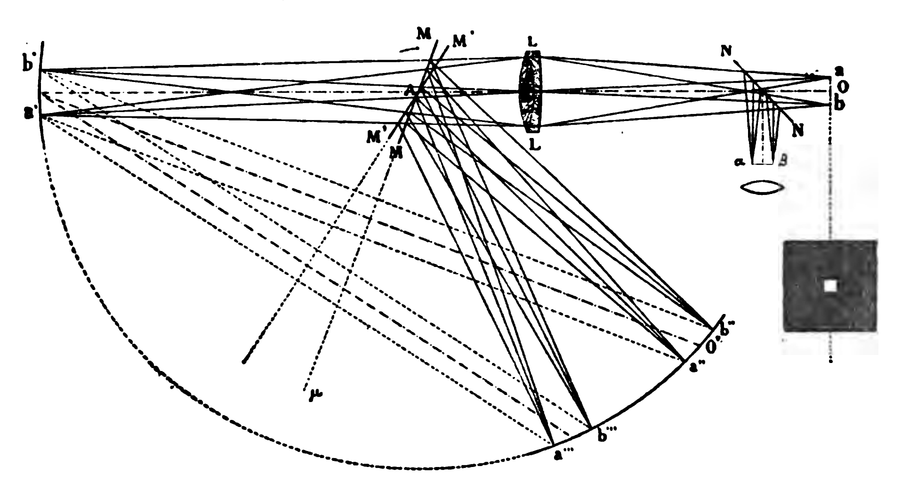


Fig. 32. Méthode de Léon Foucault pour la mesure directe de la vitesse de la lumière[1].

discontinues se succèderont assez rapidement pour que l'impression reçue par un œil placé sur le miroir concave équivaille à la sensation d'une lumière unique et constante. Ces images successives sont renvoyées sur l'axe A du miroir plan ; mais, entre l'instant où le faisceau a été une première fois réfléchi en ce point et l'instant où il revient sur ses pas pour se réfléchir

1. *Légende explicative de la figure* 32. — Cette figure donne la marche des faisceaux qui partent de deux points *a* et *b* de l'ouverture et qui, après leur passage dans la lentille L et leur réflexion sur le miroir tournant, vont former sur les miroirs concaves fixes des images *a″ b″*, *a‴ b‴* de ces mêmes points. La vitesse de rotation n'étant pas considérable, la réflexion sur ces derniers miroirs se fait avant que le miroir MM ait tourné d'une quantité appréciable. Dès lors, après cette seconde réflexion, les faisceaux reviendront sur eux-mêmes et formeront des images qui coïncideront avec les points *a* et *b* de l'ouverture, ou aussi des images α et β en avant de la glace NN. Dans cette première hypothèse, la déviation n'existe pas ou est trop petite pour être sensible.

une seconde fois, il s'écoule un certain temps, qui dépend de la distance O'A et de la vitesse de la lumière. Pendant ce temps le miroir vertical a tourné d'un certain angle α : au lieu de la position MM, il occupe la position M'M' par exemple. Dès lors la réflexion, au lieu de se faire suivant la ligne AO, se fera sui-

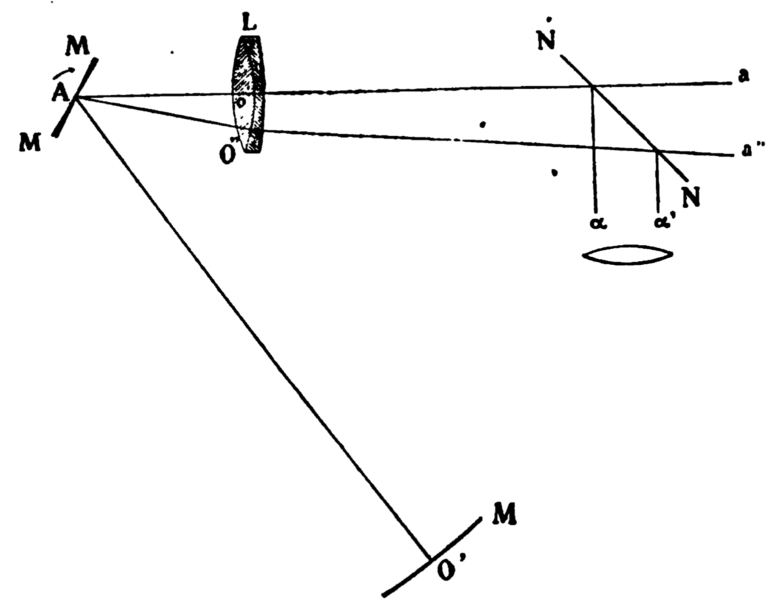


Fig. 33. — Méthode de Léon Foucault pour la mesure directe de la vitesse de la lumière. Déviation de l'image[1].

vant la ligne AO″ (fig. 33), faisant avec la première l'angle 2α[2], et c'est en a'' qu'ira se reformer l'image de l'ouverture; de même l'image réfléchie sur la glace sans tain, au lieu de tomber en α, tombera à côté en α'. L'observateur pourra constater et mesurer cette déviation, et cela suffit pour qu'on puisse, si l'on connaît d'ailleurs le nombre de tours effectué par le miroir tournant, en déduire la vitesse de la lumière.

1. *Légende explicative de la figure* 33. — Dans cette figure, la rotation du miroir tournant est devenue assez grande pour qu'il soit possible de constater la déviation. Le point a envoie sur l'axe du miroir M un rayon qui s'y réfléchit et va tomber sur le miroir concave. De là il revient sur ses pas; mais, trouvant le miroir dans une position nouvelle, il se réfléchit selon une direction différente de celle par laquelle il était venu. L'image va se former en a', ou en α', où l'observation montre qu'elle ne coïncide plus avec le même point de la mire.

2. L'angle de réflexion R, comme on le verra dans le chapitre suivant, étant toujours égal

A la vérité, cette déviation est excessivement petite, même quand le mouvement de rotation du miroir est considérable. Pour en rendre la constatation plus aisée, Léon Foucault prenait pour source de lumière celle qui passe au travers des espaces linéaires ménagés entre les fils d'un réseau très fin. « Bien que l'image qu'on en obtient, dit-il, ne soit jamais nette, elle se présente sous la forme d'un système de rayures blanches et noires semblables à des franges incolores et dont chacune présente un maximum et un minimum de lumière bien déterminé. Ainsi que les fils mêmes du réseau, ces espaces lumineux ou obscurs sont distants les uns des autres de $\frac{1}{11}$ de millimètre, et si, pour les observer, on place dans l'oculaire un micromètre divisé en dixièmes de millimètre, les deux systèmes de lignes fonctionnent, par leurs déplacements relatifs, à la manière du vernier, et permettent de saisir, sans équivoque, dans l'image un déplacement de $\frac{1}{100}$ de millimètre. D'après la vitesse déjà connue de la lumière, avec un objectif de 2 mètres de foyer et en opérant sur un double parcours de 4 mètres, on trouve qu'il ne faut pas donner au miroir une vitesse bien exagérée (6 à 800 tours) pour obtenir des déplacements de 2 à 3 dixièmes de millimètre. »

à l'angle d'incidence I, il est aisé de voir qu'un déplacement angulaire du miroir, qui augmentera l'angle d'incidence I de l'angle α, diminuera d'autant l'angle du premier rayon

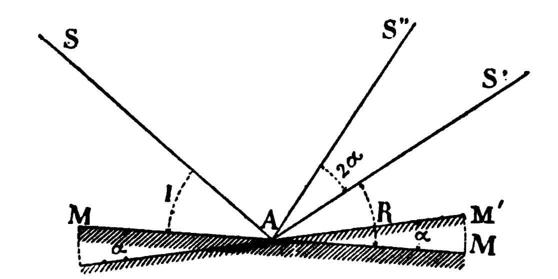


Fig. 34. — Déviation du rayon réfléchi double de l'angle de rotation.

réfléchi. Pour que l'angle nouveau de réflexion M'AS'' soit égal au nouvel angle d'incidence, il faudra donc que le rayon réfléchi AS'' fasse un angle double 2α avec l'ancien AS'.

Nous verrons plus loin ce principe fort simple servir à la construction de certains instruments d'optique, par exemple du sextant.

Les premières expériences de Foucault réussirent dans l'air avec un miroir qui ne faisait pas plus de 25 à 30 tours par seconde : la déviation fut manifeste. Ce n'était encore que constater la propagation successive des rayons lumineux.

Pour exécuter dans l'eau les mêmes expériences, il interposait « entre le miroir tournant et le miroir concave une colonne de ce liquide maintenue entre deux glaces parallèles dans un tube métallique conique T, intérieurement verni au copal, afin que l'eau y demeurât transparente et limpide ». Il put constater

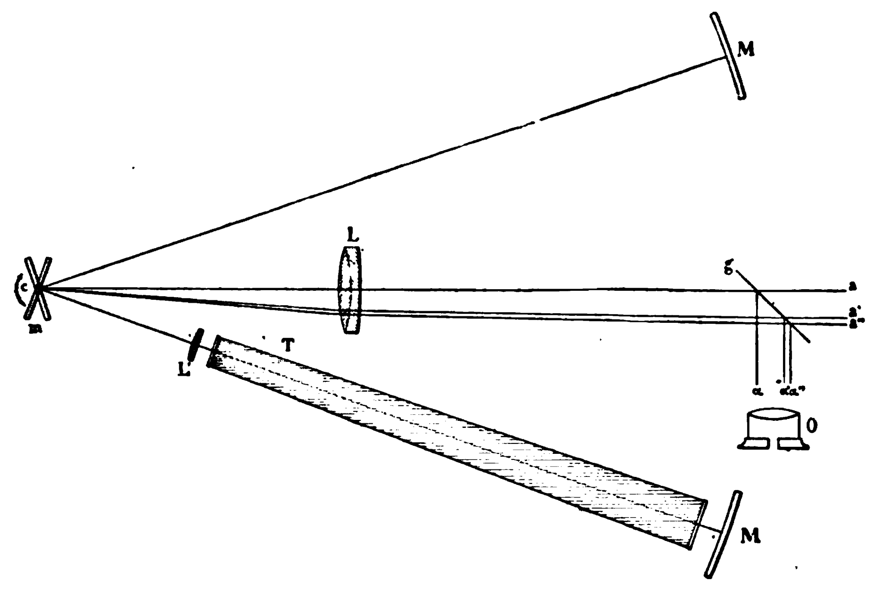


Fig. 35. — Comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau.

de la même manière la déviation subie par l'image après son double passage dans l'eau, en donnant au miroir un mouvement convenable de rotation. Maintenant, pour comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, sans être obligé de déterminer la valeur absolue de chacune d'elles, voici comment procédait l'ingénieux et savant physicien.

Il plaçait, à droite et à gauche du faisceau direct, deux miroirs concaves MM (fig. 35), appartenant à la même sphère et ayant en C leur centre commun. Sur l'un tombait le rayon mobile après sa réflexion sur le miroir tournant ; pour tomber sur

l'autre, la lumière devait avoir traversé le tube rempli d'eau. Chacun revenant sur ses pas donnait une image, et ces deux images se seraient trouvées confondues sans l'artifice particulier auquel eut recours Léon Foucault. En masquant complètement le miroir placé en face de la colonne liquide, on ne voyait que l'image dans l'air, qui était vive et blanche, comme le montre la figure 36, 1. En masquant l'autre miroir, on ne voyait au contraire que l'image dans l'eau, qui devenait verte et sombre à cause de l'interposition de la colonne d'eau. Pour distinguer

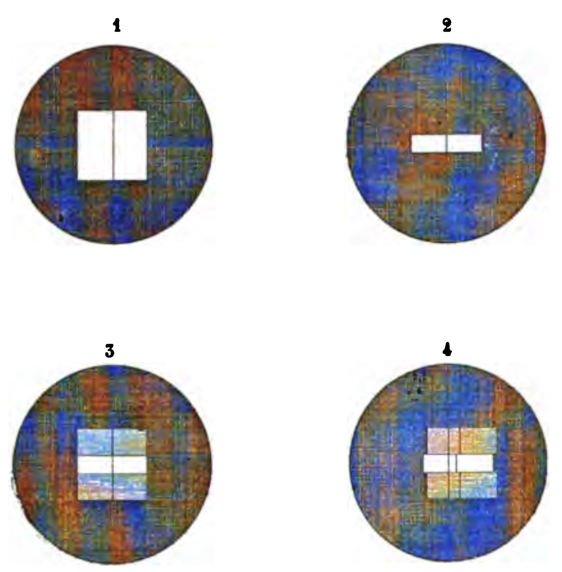


Fig. 36. — Images de l'ouverture : 1, image dans l'air; 2, image dans l'air réduite par l'écran; 3, images dans l'air et dans l'eau superposées; 4, déviations comparées.

ces deux images, tout en les observant simultanément, il couvrait le premier miroir d'un écran percé d'une fente horizontale, et réduisait ainsi l'image dans l'air, qui prenait l'aspect de la figure 36, 2. Alors l'observation simultanée des deux images produisait l'effet indiqué dans la figure 36, 3, dans l'hypothèse où la rotation du miroir tournant était assez rapide pour confondre les impressions sans qu'il y eût encore de déviation sensible. L'image perçue est alors « formée de la superposition de l'image dans l'eau conservant toute sa hauteur, son intensité et sa couleur propre, et de l'image dans l'air, plus vive et plus

basse, traversées toutes deux par le même trait vertical et rectiligne (le fil de la mire) ».

Alors, lançant le miroir à toute vitesse, Foucault vit l'image entière se déplacer, mais en se disloquant comme le montre la figure 36, 4. Le trait vertical parut brisé et il mesura les déviations par comparaison avec un fil vertical disposé dans l'oculaire au lieu même où se formait l'image du fil de la mire avant qu'il y eût déviation.

Il trouva ainsi une plus forte déviation dans l'eau que dans l'air. « Nous arrivons donc, dit-il, à cette conclusion définitive et à tout jamais inconciliable avec le système de l'émission :

« *La lumière se meut plus vite dans l'air que dans l'eau.* »

Ce premier résultat était, comme on voit, de la plus haute importance au point de vue de la théorie. Mais il ne donnait pas encore numériquement la valeur de la vitesse absolue de la lumière. Il fallait, pour obtenir cette valeur, pouvoir mesurer avec exactitude, outre la déviation de l'image observée dans l'air, la vitesse de rotation du miroir tournant, en d'autres termes le nombre de tours que, dans chaque expérience, le miroir effectue dans l'intervalle d'une seconde[1].

Voici comment Léon Foucault résolut cette seconde moitié du problème. Nous empruntons à son Mémoire la description

1. Une relation très simple existe, en effet, entre la déviation, la vitesse de rotation, les distances des parties de l'appareil et l'inconnue du problème, qui est la vitesse de la lumière. Pendant que la lumière parcourt deux fois la distance l du miroir fixe au miroir tournant, ou $2l$, ce dernier tourne d'un certain angle ω, dont la valeur angulaire se mesure par le quotient de $2\pi n$ (n étant le nombre des tours du miroir en une seconde) par la fraction de seconde nécessaire pour parcourir cette distance, ou par $\frac{V}{2l}$. On aura

$$\omega = \frac{2\pi n . 2l}{V},$$

V étant le nombre de mètres que la lumière parcourt en une seconde.

D'autre part, ω est égal aussi à la moitié de la déviation mesurée de l'image : $\omega = \frac{d}{2r}$, en appelant r la distance de la mire au centre du miroir tournant. On tire aisément de ces deux relations la valeur de la vitesse de la lumière :

$$V = \frac{8\pi n l r}{d}.$$

de l'appareil moteur dont il s'est servi, et des moyens qu'il employa pour obtenir une vitesse constante du miroir et pour la mesurer.

« Disons d'abord comment on imprime au miroir une vitesse constante.

« Ce miroir en verre argenté M, qui a $0^m,014$ de diamètre, est monté directement sur l'axe AA d'une petite turbine à air d'un

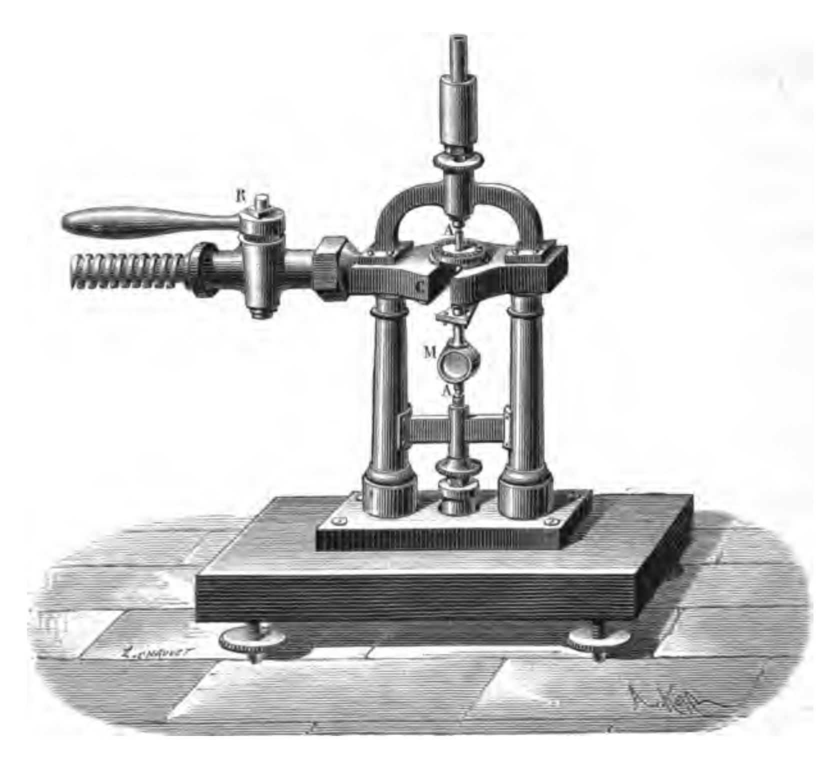


Fig. 37. — Turbine imprimant le mouvement au miroir.

système connu (fig. 37) admirablement construite par M. Froment; l'air est fourni par une soufflerie à haute pression de M. Cavaillé-Coll, qui s'est acquis une juste renommée dans la fabrication des grandes orgues ; et comme il importe que la pression soit d'une grande fixité, au sortir de la soufflerie l'air traverse un régulateur récemment imaginé par M. Cavaillé et dans lequel la pression ne varie pas de $\frac{1}{5}$ de millimètre sur $0^m,30$ de colonne d'eau. En s'écoulant par les orifices de la turbine,

l'air représente donc une force motrice remarquablement constante ; d'un autre côté, le miroir en s'accélérant rencontre bientôt dans l'air ambiant une résistance qui, pour une vitesse donnée, est aussi parfaitement constante. Le mobile, placé entre ces deux forces contraires qui tendent à l'équilibre, ne peut manquer de prendre et de garder une vitesse uniforme.

« Restait enfin à compter le nombre de tours ou plutôt à imprimer à ce mobile une vitesse déterminée. Ce problème a été complètement résolu de la manière suivante :

« Entre le microscope et la glace à réflexion partielle se trouve un disque circulaire dont le bord finement denté empiète sur l'image qu'on observe et l'intercepte en partie ; le disque tourne uniformément sur lui-même, en sorte que si l'image brillait d'une manière continue, les dents qu'il porte à sa circonférence échapperaient à la vue par l'uniformité du mouvement ; mais l'image n'est pas permanente, elle résulte d'une série d'apparitions discontinues qui sont en nombre égal à celui des révolutions du miroir ; et, dans le cas particulier où les dents de l'écran se succèdent aussi en même nombre, il se produit pour l'œil une illusion facile à expliquer qui fait apparaître la denture comme si le disque ne tournait pas. Supposons que ce disque portant n dents à sa circonférence fasse un tour par seconde, et qu'on mette la turbine en marche ; si en réglant l'écoulement de l'air on maintient l'apparente fixité des dents, on pourra tenir pour certain que le miroir fait effectivement n tours par seconde. »

En opérant sur une distance totale de 20 mètres, et imprimant au miroir tournant une vitesse de 400 tours par seconde, Léon Foucault a obtenu en 1862, pour la vitesse de la lumière dans l'air, le nombre de 298 000 kilomètres par seconde.

Un savant américain, M. A. Michelson, a fait en 1879, en modifiant la méthode de Léon Foucault, une série d'expériences qui lui ont donné pour la vitesse de la lumière 299 940 kilomètres par seconde.

§ 5. VITESSE DE LA LUMIÈRE. — COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS PAR LES DIVERSES MÉTHODES.

Les calculs de Delambre ont donné 493 secondes pour le temps que met la lumière à franchir le rayon moyen de l'orbite de la Terre. Pour en déduire la vitesse réelle de la lumière, par exemple le nombre de kilomètres qu'elle franchit en une seconde, il faut donc connaître la valeur numérique de ce rayon, la distance moyenne du Soleil à la Terre, ou enfin, si l'on préfère, la parallaxe du Soleil.

Cette parallaxe était regardée comme égale à 8″,57, nombre déduit par l'astronome Encke de la discussion des observations des passages de Vénus au milieu du siècle dernier. Depuis, des recherches nouvelles ont fait considérer cette valeur comme trop faible : elle a été portée à 8″,86.

La première valeur de la parallaxe solaire conduit à une vitesse de la lumière égale à environ 310000 kilomètres par seconde : c'est un nombre différant peu de celui qu'a obtenu M. Fizeau par ses premières expériences. Si, au contraire, on adopte la parallaxe 8″,86, la vitesse de la lumière se réduit à 299000 kilomètres. C'est à peu de chose près le résultat trouvé en 1862 par M. Léon Foucault et en 1873 par M. Cornu. Il diffère peu également du nombre trouvé en 1875 par ce dernier physicien.

En partant de la constante de l'aberration, qui, d'après les derniers travaux de Struve, est égale à 20″,445, on peut aussi obtenir la vitesse absolue de la lumière. Mais, comme dans le cas des éclipses des satellites de Jupiter, il faut supposer connue la parallaxe solaire. La parallaxe 8″,57 donne le nombre 308000 kilomètres, et la parallaxe 8″,86 le nombre 297600 kilomètres.

Il est bien clair qu'on pourrait résoudre le problème en sens inverse, c'est-à-dire prendre pour point de départ la vitesse

absolue de la lumière mesurée directement à la surface de la Terre soit par la méthode de M. Fizeau, soit par celle de Léon Foucault; puis, s'appuyant sur les données astronomiques de l'équation de la lumière (calculée par Delambre) ou de l'aberration (calculée par Struve), en déduire par le calcul la valeur de la parallaxe solaire.

Dans quelle mesure, avec quelle approximation ces problèmes intéressants sont-ils aujourd'hui résolus? Il ne nous appartient pas de prononcer; mais les nombres qui précèdent montrent qu'on ne s'éloignera pas beaucoup de la vérité en considérant la vitesse de la lumière comme égale à 300 000 kilomètres par seconde, nombre correspondant à la parallaxe 8",81.

Adoptons provisoirement 300 000 kilomètres pour le nombre qui exprime la vitesse de la lumière en une seconde de temps moyen, et comparons cette vitesse aux vitesses de divers corps et de divers agents physiques.

Le son se propage avec une vitesse de $330^{m},7$ dans l'air à 0°, de 1435^{m} dans l'eau à 15°. La lumière se meut donc 910 000 fois plus vite que le son dans l'air, 209 000 fois plus vite que le son dans l'eau. Un boulet de canon de 12 kilogrammes, chassé par une charge de 6 kilogrammes de poudre, parcourt 500 mètres dans la première seconde; c'est une vitesse 600 000 fois plus petite que celle de la lumière. Par le fait du mouvement de rotation de la Terre, un point de l'équateur se déplace, de l'ouest à l'est, de 465 mètres en une seconde : la lumière a un mouvement de propagation 645 000 fois plus rapide; elle se meut enfin 10 186 fois plus vite que notre planète même, qui franchit en moyenne $29^{kil},45$ par seconde sur son orbite.

Seule la vitesse de propagation de l'électricité est comparable à la vitesse de la lumière. Seulement, il s'en faut de beaucoup qu'elle soit déterminée avec la même précision : ce qui tient aux conditions très variables du mouvement des courants dans les corps conducteurs. Par exemple, Wheatstone a trouvé 420 000 kilomètres pour la vitesse de l'électricité dans un fil de cuivre;

MM. Fizeau et Gounelle ont trouvé 1 800 000 kilomètres. Enfin MM. Walker et Mitchell ont obtenu 30 000 et 45 600 kilomètres pour la vitesse de l'électricité dans les fils de fer des télégraphes américains. Dans d'autres conditions, cette vitesse peut être beaucoup moindre que ne l'indiquent ces derniers nombres.

L'excessive rapidité de la propagation de la lumière a fait choisir pour unité des distances sidérales l'espace énorme que parcourt la lumière dans l'intervalle de temps d'une année. Cet espace n'est pas moindre de 9 trillions 500 billions de kilomètres. Ainsi, quand les astronomes veulent exprimer la distance qui sépare les étoiles de notre monde planétaire, ils disent que la lumière met *tant d'années* à franchir cette distance. Par exemple, l'étoile α du Centaure est à une distance de trois années et demie de la lumière. Pour Sirius, on compte vingt et une années ; pour la Chèvre, soixante-dix ans. Des plus petites étoiles visibles à l'œil nu, la lumière met en moyenne 225 ans à nous parvenir, et elle met près de 600 ans pour franchir la distance qui nous sépare d'une étoile de la neuvième grandeur.

Une conséquence bien simple du fait que la lumière ne se propage pas instantanément, qu'elle met, pour venir à nous, un temps d'autant plus long que la source d'où elle émane est plus éloignée, c'est que nous ne voyons jamais le ciel tel qu'il est.

Au moment où notre regard est fixé sur une région parsemée d'étoiles, les diverses ondes lumineuses qui, en frappant notre rétine, nous donnent autant de sensations distinctes et nous paraissent témoigner de l'existence actuelle des étoiles d'où elles émanent, sont bien en effet des messagers partis de ces mondes lointains, mais des messagers partis il y a longtemps déjà, il y a des années, des siècles, des milliers d'années peut-être. Les nouvelles qu'ils nous apportent sont des nouvelles d'un temps passé, et nous renseignent, non sur l'état où se trouvent les étoiles observées, mais sur celui qu'elles avaient à l'origine du départ de chacune des ondes reçues. C'est ainsi qu'Arago a pu dire :

« L'aspect du ciel, à un instant donné, nous raconte, pour ainsi dire, l'histoire ancienne des astres, » et que nous avons dit nous-même ailleurs :

« Nous ne voyons pas le ciel *comme il est*, mais comme il était, non pas même comme il était à une époque donnée, mais à la fois à plusieurs époques, à une infinité d'époques données ; de sorte que chaque étoile pourrait être annotée d'une date particulière de l'histoire du ciel. Ici, nous assistons au spectacle d'une nébuleuse contemporaine d'Homère ; là, ce soleil nous envoie des feux qui datent de Périclès ; la lumière de la Chèvre est en route depuis notre grande épopée révolutionnaire de 92 (ceci était écrit en 1862 ; aujourd'hui il faudrait dire depuis les premières années du dix-neuvième siècle). Et ainsi à l'infini. Spectacle étrange, qui laisse la pensée s'abîmer devant la bizarrerie d'un fait où viennent se confondre à la fois, sans contradiction pour la raison, les temps et les distances ! »

L'importance philosophique d'un point de vue qui semble si nouveau quand on y songe pour la première fois, est telle, que nous citerons, pour terminer ce paragraphe, la belle page qu'Humboldt a consacrée dans son *Cosmos* à la même idée.

Venant de parler des phénomènes des étoiles temporaires, il ajoute :

« Tous ces faits appartiennent en réalité à des époques antérieures à celles où les phénomènes de lumière vinrent les annoncer aux habitants de la Terre ; ce sont comme les voix du passé qui arrivent jusqu'à nous. On a dit avec vérité que, grâce à nos puissants télescopes, il nous est donné de pénétrer à la fois dans l'espace et dans le temps. Nous mesurons, en effet, l'un par l'autre : une heure de chemin, c'est pour la lumière 110 millions de myriamètres à parcourir. Tandis que, dans la Théogonie d'Hésiode, les dimensions de l'univers sont exprimées à l'aide de la chute des corps (« pendant neuf jours et neuf nuits seulement, l'enclume d'airain tomba du ciel sur la Terre »), Herschel estimait que la lumière émise par les dernières nébuleuses encore visibles dans son télescope de 40 pieds

devait employer près de deux millions d'années[1] pour venir jusqu'à nous! Ainsi bien des phénomènes ont disparu longtemps avant d'être perçus par nos yeux; bien des changements, que nous ne voyons pas encore, se sont depuis longtemps effectués. Les phénomènes célestes ne sont simultanés qu'en apparence; et quand on voudrait placer plus près de nous les faibles taches de nébuleuses ou les amas d'étoiles, quand même on réduirait les milliers d'années, qui mesurent leurs distances, la lumière qu'ils ont émise et qui nous parvient aujourd'hui n'en resterait pas moins, en vertu des lois de sa propagation, le témoignage le plus ancien de l'existence de la matière. C'est ainsi que la science conduit l'esprit humain des plus simples prémisses aux plus hautes conceptions, et lui ouvre ces champs sillonnés par la lumière où « des myriades de mondes germent comme l'herbe de la nuit ».

1. « Hence it follows that the rays of light of the remotest nebulæ must have been almost two millions of years on their way, and that consequently, so many of years ago, this object must already have had *an existence* in the sidereal heave, in order to send out those rays by which we now perceive it. » (W. Herschel, *Phil. Trans.*, 1802.)

CHAPITRE IV

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

§ 1. CONDITIONS DE VISIBILITÉ DES CORPS. — SOURCES LUMINEUSES DIRECTES · CORPS QUELCONQUES.

Quelles sont les conditions extérieures de visibilité des corps?

Considérons d'abord une source lumineuse proprement dite. Si, entre cette source et l'œil, le milieu interposé est transparent et de plus homogène, on peut dire que la visibilité est directe : le faisceau lumineux émané de chaque point de la source suit alors en effet une route rectiligne. Cela résulte de la loi de propagation de la lumière en ligne droite, dans l'hypothèse où le milieu traversé par elle est homogène. En reconstruisant géométriquement les lignes droites divergentes qui constituent les divers faisceaux, on retrouverait à leur point de concours le point lumineux lui-même.

Il n'en est plus ainsi — l'observation nous permettra de le constater bientôt — si l'espace compris entre l'œil et la source de lumière est occupé par deux ou plusieurs milieux différents, séparément homogènes. Le chemin suivi par le faisceau est toujours rectiligne dans chaque milieu; mais en général il y a déviation en passant d'un milieu dans un autre : la route totale, composée d'une série de lignes droites, est alors une ligne brisée, dont le dernier élément donnera la direction suivant laquelle l'œil verra le point lumineux. L'image de la source se trouve donc autrement placée que dans le cas d'un milieu

transparent unique; elle est déviée, et c'est à ce phénomène de déviation qu'on donne le nom de *réfraction de la lumière.*

Nous supposons ici que les milieux traversés par la lumière sont doués d'une absolue transparence; dans cette hypothèse, la source seule est visible; la matière ou la substance qui compose le milieu n'est pas perçue par l'œil, n'est pas visible elle-même.

Mais, en réalité, comme nous l'avons dit déjà, une telle transparence absolue n'existe pas dans la nature, ou tout au plus peut-elle être admise pour les espaces interstellaires qui ne sont pas immédiatement accessibles à l'observation. Les milieux que nous connaissons, solides, liquides ou gazeux, le verre, l'eau, l'air par exemple, ne sont doués que d'une transparence relative. La lumière qui les traverse s'y trouve en partie absorbée: il en résulte pour ces milieux une illumination plus ou moins intense, qui croît avec leur épaisseur, et en outre le plus souvent une certaine teinte ou coloration qui, en devenant sensible à l'œil, les rend visibles pour nous. La lumière ainsi reçue et qu'il faut distinguer de celle qui rend la source visible, est dite lumière transmise. Le milieu perçu est visible par transmission. Des milieux doués du plus haut degré de transparence, on passe aux milieux translucides, puis aux corps ou milieux opaques, par degrés pour ainsi dire insensibles. La lumière d'une source se diffuse ainsi de plus en plus à l'intérieur du milieu, de sorte que la source elle-même finit par n'être plus visible, tandis que les divers points du milieu que pénètre sa lumière sont au contraire seuls aperçus par l'œil. On arrive ainsi à l'opacité, dès que l'absorption est complète, ou du moins dès que l'intensité de la lumière transmise est assez faible pour ne plus causer à l'œil d'impression sensible.

Telles sont les conditions de visibilité d'une source de lumière, c'est-à-dire d'un corps qui est lumineux de lui-même, par incandescence ou autrement. Voyons maintenant ce qu'elles sont pour les corps qui ne sont pas des sources proprement dites.

En ce cas, de tels corps ne sont visibles que s'ils sont éclairés, c'est-à-dire que si leur surface reçoit d'une source quelconque une certaine quantité de lumière. L'observation montre alors que, selon la nature du corps et l'état de sa surface, une partie plus ou moins grande de la lumière reçue est renvoyée dans le milieu d'où elle arrive, après avoir subi dans sa direction primitive une certaine déviation. C'est ce changement de route, ce retour des rayons lumineux sur eux-mêmes ou suivant des directions voisines, mais dans le milieu d'où ils étaient partis, qui constitue le phénomène de la *réflexion de la lumière*.

Prenons un exemple familier. Plaçons une feuille de papier blanc et mat à la lumière du jour, ou à celle d'une lampe, d'une bougie, peu importe. A l'instant, nous voyons tous les points de la surface du papier. Chacun de ces points se trouve éclairé, en d'autres termes, joue pour notre œil le rôle d'une source lumineuse; si la masse d'air ou le milieu diaphane qui sépare le papier de l'œil est homogène, la marche des rayons lumineux qui émane du point est rectiligne, comme la route suivie par le faisceau qui, de la source, est venu tomber en ce point. En changeant l'œil de position, le même point est vu de la même manière; il rayonne donc dans tous les sens, et la seule différence qu'on ait à constater est un changement d'intensité qui dépend de l'inclinaison de la surface par rapport à la ligne droite que suit la lumière renvoyée dans l'œil.

Remplaçons maintenant la feuille de papier par un autre objet quelconque, mais dont la surface soit toujours mate, c'est-à-dire ne soit ni brillante ni polie. Cet objet sera visible de la même manière. La couleur, l'intensité de la lumière pourront varier considérablement, mais avec cette circonstance caractéristique, que la lumière sera toujours réfléchie de chaque point, dans le milieu diaphane environnant, et cela dans toutes les directions possibles. L'œil placé dans une position quelconque verra toujours chaque point de la surface du corps, pourvu qu'aucun obstacle opaque ne se trouve interposé sur le trajet rectiligne des rayons réfléchis.

La lumière ainsi réfléchie par les corps mats, rugueux, à surface irrégulière, prend plus particulièrement le nom de *lumière diffuse*.

Les choses vont se passer d'une tout autre façon, si nous mettons en présence de la source de lumière, non plus une surface mate, mais une surface polie, une plaque métallique, ou, si l'on veut, la surface d'un bain de mercure bien purifié. Tout le monde sait qu'alors l'œil, s'il veut recevoir la lumière réfléchie par un des points de la surface polie, doit se placer dans une position particulière, qui varie avec celle du point. La réflexion ne se fait plus dans toutes les directions autour de ce point, comme dans le cas de la feuille de papier. Il y a une autre différence essentielle, conséquence de la première : c'est que toute la surface du bain de mercure ne paraît pas illuminée pour une même position de l'œil : il n'y en a qu'une portion limitée, et dont la forme apparente est telle qu'elle reproduit, pour ainsi dire identiquement, l'image de la source, la flamme de la bougie ou de la lampe. La portion de la surface qui environne cette image est comparativement obscure, ou du moins elle ne fait que renvoyer de la même manière l'image des objets plus ou moins éclairés qui se trouvent opposés au bain de mercure.

Ce n'est donc pas, à proprement parler, la surface des corps polis qui devient visible, quand ces corps reçoivent la lumière émanée d'une source quelconque : c'est cette source même et les objets éclairés par elle. Cette surface est dite alors un miroir[1].

Voilà pourquoi il faut distinguer de la réflexion irrégulière ou diffuse la réflexion spéciale aux corps dont la surface est plus ou moins parfaitement polie : celle-ci se nomme ***réflexion***

1. Si les deux expériences que nous venons de décrire successivement sont faites à l'intérieur d'une chambre obscure, voici ce qu'on observera. La feuille de papier ou l'objet mat à surface non polie qu'on placera sur le trajet du faisceau lumineux solaire, donnera une image du Soleil qui sera visible de tous les points de la chambre (voy. fig. 1). Au contraire le miroir, plaque polie ou surface de mercure, restera comparativement obscure ou invisible, et, pour voir l'image du Soleil, l'observateur devra se placer dans une direction spéciale. Cette même image se trouvera alors projetée ou réfléchie dans cette même direction, sur une paroi opposée de la chambre noire.

spéculaire (du mot latin ***speculum***, miroir); la première reçoit le nom particulier de ***diffusion***. Nous allons étudier tout d'abord les phénomènes de réflexion spéculaire, la loi qui régit ces phénomènes étant très simple et susceptible d'une définition rigoureusement géométrique.

§ 2. LOIS DE LA RÉFLEXION SPÉCULAIRE. — ÉGALITÉ DES ANGLES D'INCIDENCE ET DE RÉFLEXION DES RAYONS LUMINEUX.

Bien avant que l'industrie humaine, suscitée par les besoins de l'hygiène, du luxe et de la coquetterie, eût songé à polir les métaux, le verre, et à faire de leurs surfaces brillantes des miroirs et des glaces, la nature nous offrait des exemples du phénomène auquel les physiciens ont donné le nom de ***réflexion spéculaire de la lumière***. C'est ainsi que la surface d'une eau limpide et tranquille, d'un étang ou d'un lac (pl. I), renvoie aux yeux l'image fidèle du paysage qui l'entoure, la voûte azurée du ciel, les nuages, le soleil ou les étoiles, les arbres, les rochers, les êtres animés qui se promènent sur les bords ou naviguent à la surface de la nappe liquide : n'est-ce pas là, sur une grande échelle, le modèle que les arts industriels n'ont fait que copier, et qui aurait pu suffire pour étudier, je ne dirai pas commodément, mais avec fidélité, la route que suit la lumière, lorsque, partant des sources lumineuses ou des objets éclairés, elle vient rebondir à la surface des corps? Mais le besoin de comprendre ne vient jamais qu'après celui d'admirer ou de jouir, et la découverte des lois qui régissent la réflexion de la lumière fut sans doute bien postérieure à l'imitation des phénomènes que nous venons de décrire.

Voyons donc quelles sont ces lois, et ne nous occupons d'abord que de la route suivie par un rayon lumineux qui se réfléchit en un point d'une surface plane et polie. Le milieu où le rayon est renvoyé étant toujours supposé homogène, on conçoit qu'après sa réflexion il se propagera en ligne droite comme

auparavant. Il s'agit de déterminer la direction précise du rayon réfléchi.

Une première détermination, susceptible de peu de précision il est vrai, pourrait s'obtenir à l'aide de la chambre obscure.

Nous avons vu en effet qu'un pinceau de lumière solaire qui pénètre par le trou du volet marque sa direction dans l'air de la chambre, en éclairant les fines poussières qui s'y trouvent presque toujours en suspension. Supposons qu'alors on place un plan de métal poli, ou un morceau de verre sur le trajet du faisceau incident. On pourra mesurer l'angle que fait le faisceau avec le plan du miroir. Mais la lumière en se réfléchissant marquera, dans l'air et de la même manière que le pinceau incident, son passage et sa direction. On mesurera de même l'angle d'inclinaison des rayons réfléchis avec le miroir.

On trouvera ainsi aisément, mais grossièrement, les deux lois de la réflexion spéculaire que nous allons énoncer en décrivant un moyen plus précis de vérification expérimentale.

Prenons pour surface réfléchissante un bain de mercure, et pour objet lumineux une étoile dont les rayons, quand ils arrivent d'une distance pour ainsi dire infinie à la surface de la Terre, peuvent tous être considérés comme rigoureusement parallèles.

Considérons l'un de ces rayons SI (fig. 38), qui tombe au point I de la surface du bain de mercure. IN étant la verticale au même point, ou la normale à la surface réfléchissante, l'angle SIN est ce qu'on nomme l'*angle d'incidence*. Le rayon SI se réfléchit suivant la direction IR, de sorte qu'en plaçant l'œil dans cette direction, on verra l'image de l'étoile dans le bain de mercure. L'angle du rayon réfléchi avec la normale IN est ce qu'on nomme l'*angle de réflexion*. Or il est aisé de vérifier les deux lois suivantes :

1° *Le rayon incident, le rayon réfléchi sont dans le même plan avec la normale au point d'incidence;* le plan des deux rayons est donc toujours perpendiculaire à la surface réfléchissante ;



RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.
Le *Lac du Miroir* dans la vallée d'Yosemiti (États-Unis).

2° *L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux entre eux.*

La vérification de ces deux lois peut se faire au moyen de l'instrument indiqué dans la figure. Cet instrument, formé d'un cercle métallique divisé porté sur un pied, et de deux lunettes fixées au centre du limbe et pouvant tourner dans son plan,



Fig. 38. — Étude expérimentale des lois de la réflexion de la lumière.

est établi dans une position telle, que le limbe soit parfaitement vertical. A l'aide de l'une des lunettes, et en faisant tourner convenablement le limbe sur son axe vertical, on vise le bain de mercure de manière à voir l'image de l'étoile réfléchie : à ce moment, le rayon réfléchi coïncide avec l'axe de la lunette, et l'angle N'I'R' est égal à l'angle NIR, c'est-à-dire à l'angle de réflexion. Si maintenant, à l'aide de l'autre lunette, on vise directement l'étoile, on constate qu'il n'y a point à changer l'in-

strument de position ou, pour employer une expression plus précise, que le plan du limbe, dans sa position actuelle, contient le rayon visuel émané de l'étoile. En d'autres termes, le rayon incident S'I' est dans le même plan vertical que le rayon réfléchi. Cela démontre déjà la première loi, puisque SI est parallèle à S'I'. De plus, l'angle S'I'N' est rigoureusement égal à l'angle d'incidence, puisque les côtés de ces angles sont parallèles; et comme en lisant sur le limbe, en degrés, la position des deux lunettes, on trouve que les arcs compris entre la normale I'N' et leurs directions sont égaux entre eux, il en résulte qu'il y a égalité entre les angles de réflexion et d'incidence : ce qui démontre la seconde loi.

Quelle que soit la position de l'étoile visée ou sa hauteur au-dessus de l'horizon, les résultats de l'observation sont les mêmes, le phénomène de réflexion est régi par les mêmes lois. Si donc l'angle d'incidence est nul, en d'autres termes, si le rayon lumineux tombe perpendiculairement à la surface réfléchissante, l'angle de réflexion est nul aussi : la route suivie au retour par le rayon coïncide avec celle du rayon incident. La lumière revient sur elle-même dans la direction précise suivant laquelle elle s'était propagée d'abord.

§ 3. IMAGES PRODUITES PAR LA RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE SUR LES MIROIRS PLANS.

La réflexion de la lumière à la surface des miroirs donne lieu à la formation d'images, c'est-à-dire à la reproduction, pour l'œil, d'apparences semblables aux objets, soit lumineux par eux-mêmes, soit simplement éclairés, qui sont situés de façon à rayonner sur cette surface. C'est un fait d'expérience; mais c'est aussi une conséquence toute simple des lois de la réflexion spéculaire.

En disant que les images sont semblables aux objets, nous supposons que la surface réfléchissante soit parfaitement plane; car les miroirs dont la surface a une courbure sphérique,

cylindrique, conique, parabolique altèrent généralement, soit dans leur forme, soit dans leurs dimensions, les objets qui s'y réfléchissent; et si la courbure est irrégulière, il est possible que l'image et l'objet n'aient plus aucune ressemblance. Cependant la loi de formation de ces images est toujours une conséquence directe des lois de la réflexion spéculaire et peut se déduire géométriquement de la loi de formation des images dans les miroirs plans. Nous commencerons donc par étudier celle-ci, et nous ferons voir que les résultats de l'observation sont identiques avec ceux que fournit le raisonnement. Mais un mot auparavant sur les diverses sortes de miroirs.

On doit considérer comme *miroir plan* toute surface réfléchissante plane et polie, que la matière qui la forme soit solide, liquide ou gazeuse; mais nous n'aurons en vue d'abord que les phénomènes de réflexion sur la surface extérieure, distinction qui est inutile s'il s'agit de miroirs plans constitués par une plaque métallique à laquelle on a donné, par un procédé industriel quelconque, un poli aussi parfait que possible, ou encore par tout autre corps opaque susceptible de poli, le marbre, le bois lisse et verni, etc. Les miroirs ordinaires sont formés d'une lame de verre à faces parallèles dont la surface postérieure est enduite d'une couche mince d'un amalgame d'étain (alliage d'étain et de mercure). L'avantage de ces miroirs consiste dans l'inaltérabilité de la couche métallique réfléchissante qui est protégée par le verre, tandis que les miroirs métalliques (acier, bronze, argent) sont rapidement ternis par l'action oxydante de l'air, de la vapeur d'eau ou des gaz que l'air contient toujours. Mais les miroirs étamés ont un autre inconvénient, celui de donner des images doubles et même multiples des objets, images qui se confondent en partie entre elles et dès lors n'ont plus la netteté d'une image unique. La surface extérieure et polie de la glace est elle-même en effet un miroir qui réfléchit une partie de la lumière incidente; une autre partie d'ailleurs est diffusée par cette surface, et celle qui arrive à la couche étamée après avoir été réfractée une première

fois dans l'intérieur du verre, se réfracte et se réfléchit une seconde fois, de sorte qu'une fraction seulement de la lumière totale arrive à l'œil pour y produire la sensation de l'image principale. Nous aurons plus loin l'occasion de revenir sur ces images multiples.

Les surfaces des liquides en repos forment aussi des miroirs naturels, et c'est ainsi qu'un bain de mercure (liquide non transparent) peut être assimilé à un miroir métallique. L'eau et les autres liquides limpides ne renvoient à l'œil qu'une faible portion de la lumière incidente, à moins que l'angle des rayons avec la surface ne soit très petit. Le reste pénètre à l'intérieur du liquide en s'y réfractant, et la plus grande partie est absorbée dès que l'épaisseur est un peu considérable.

Les surfaces de séparation des gaz d'inégales densités sont aussi réfléchissantes, et nous verrons que certains phénomènes naturels s'expliquent en partie par cette propriété.

Mais arrivons aux images données par un miroir plan, abstraction faite de la nature de la matière qui la constitue.

L'observation journalière la plus simple nous montre dans une glace ou miroir l'image fidèle de l'objet exposé. Les dimensions paraissent identiques à celles de l'objet, ou plutôt ces dimensions sont celles sous lesquelles apparaîtrait l'objet s'il était situé derrière le miroir, à une distance de son plan précisément égale à la distance qu'il occupe en avant du miroir. En outre, les positions relatives des diverses parties de l'objet ou des objets entre eux sont l'inverse des positions réelles : la droite de l'image est la gauche de l'objet, et réciproquement. Ces diverses conditions se résument en une loi dont l'énoncé géométrique est des plus simples. La voici :

Dans tout miroir plan, l'image est symétrique de l'objet.

Considérons un faisceau lumineux envoyé par l'extrémité de la flamme d'une bougie (fig. 39) à la surface d'un miroir plan. Les rayons dont il se compose vont diverger après leur réflexion. Mais l'égalité des angles de réflexion et d'incidence de chacun d'eux fait nécessairement que tous ces rayons ont leur point de

convergence derrière le miroir, en un point qui est symétriquement situé par rapport au plan du miroir et au point de la bougie d'où émane le faisceau. En un mot ce dernier point et son image sont situés à égale distance du plan du miroir et sur la même perpendiculaire à ce plan. L'œil qui reçoit le faisceau divergent sera donc affecté comme si l'objet lumineux était situé au point de convergence, et c'est là qu'il en verra l'image. Quelle que soit donc la position de l'observateur en avant du miroir, la position de l'image ne sera pas changée, bien qu'elle semble occuper des points différents sur le miroir même quand l'œil se déplace.

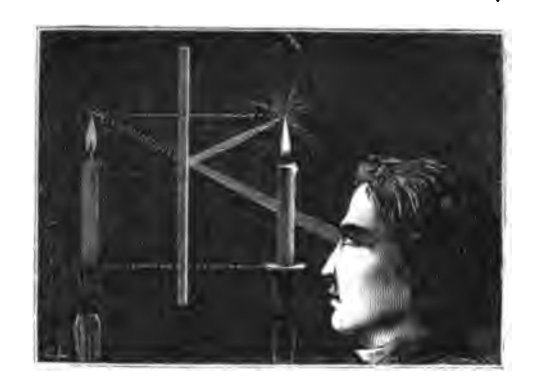


Fig. 39. — Formation des images vues par réflexion sur un miroir plan.

L'extrémité inférieure de la bougie formera son image de la même façon, et ainsi de tous les points intermédiaires. D'où l'on voit que l'image d'un objet lumineux quelconque sera formée, point par point, de toutes les images partielles symétriquement situées derrière le miroir, à des distances de sa surface égales aux distances particulières de chacun des points de l'objet. On voit clairement par là que l'image produite par la réflexion de la lumière qu'un objet envoie à la surface d'un miroir plan, n'a rien d'objectif ou de réel : c'est ce qu'on nomme une *image virtuelle*. Cette représentation n'existe que pour l'œil. On verra bientôt dans quelles circonstances peuvent se former, par voie de réflexion, des *images réelles* des objets.

L'image d'un objet peut être donnée par un miroir plan, sans pour cela que l'objet soit en face même de ce dernier. Il suffit que l'œil soit placé de manière à recevoir les rayons réfléchis, c'est-à-dire dans l'espace divergent QMM'P (fig. 40), compris entre les rayons extrêmes émanés de l'objet et venant se réflé-

chir sur le contour du miroir. Cet espace constitue le *champ* du miroir par rapport à l'objet.

Dans les miroirs ou glaces ordinaires, il est rare que la forme et la couleur des objets réfléchis ne soient pas un peu altérées. Cela tient à ce qu'il est difficile d'obtenir un poli parfait et des surfaces rigoureusement planes. De la lumière diffuse se mêle alors à la lumière réfléchie spéculairement, et communique à celle-ci une coloration propre à la substance dont le miroir est formé. On remarque aussi, dans les miroirs étamés, que les objets forment une double image. L'une, beaucoup plus faible, est donnée par la surface extérieure du miroir; l'autre, la plus brillante, est celle que donne le miroir proprement dit, c'est-à-dire la surface interne du tain. Les miroirs métalliques n'ont pas cet inconvénient, mais nous avons vu qu'ils en ont d'autres plus graves : la quantité de lumière qu'ils réfléchissent est moins vive et leur surface se ternit rapidement au contact de l'air.

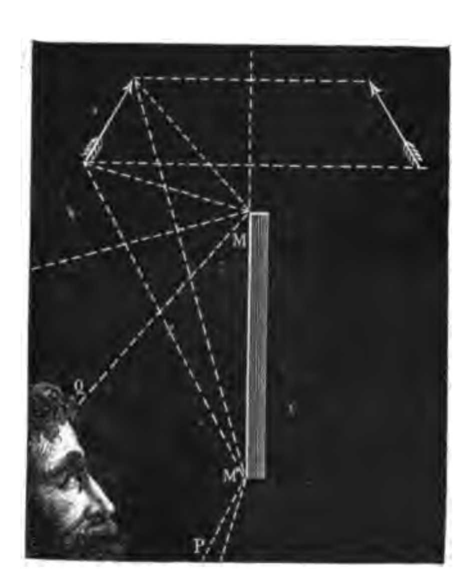


Fig. 40. — Réflexion sur un miroir plan. Champ du miroir pour un objet donné.

§ 4. IMAGES MULTIPLES PRODUITES PAR DES COMBINAISONS DE MIROIRS.

En disposant deux ou plusieurs miroirs plans d'une façon variée, on obtient des effets singuliers, provenant des réflexions multiples qui se font de l'un à l'autre des miroirs.

Le plus simple de ces effets est celui que fournissent deux miroirs plans parallèles. Un objet lumineux interposé entre les

deux miroirs fournit sur chacun d'eux une première image qui, devenant un objet lumineux pour chaque autre miroir — ou du

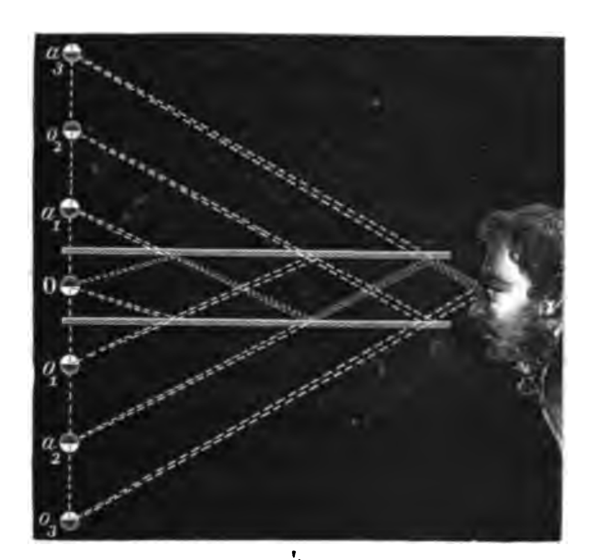


Fig. 41. — Réflexion sur deux miroirs plans parallèles. Images multiples d'un objet situé entre ces deux miroirs.

moins, à cause des lois de la réflexion, pouvant être considéré comme tel — donne lieu à deux nouvelles images plus éloignées

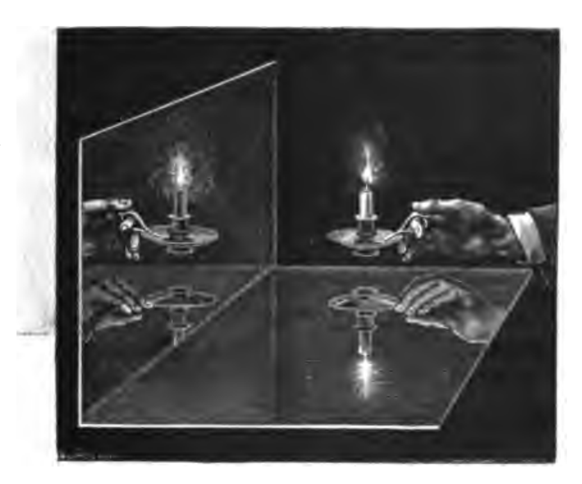


Fig. 42. — Images multiples sur deux miroirs inclinés à 90°.

que les premières. Celles-ci en forment de nouvelles à leur tour, et ainsi indéfiniment, de sorte que l'œil convenablement

placé voit une infinité d'images qui sont à la vérité de plus en plus faibles, à cause des pertes que font subir à la lumière ces réflexions successives. Ces effets s'observent aisément dans une salle contenant deux glaces parallèles et opposées. Les deux séries d'images s'y confondent facilement quand il s'agit d'un point lumineux, mais si l'on tient à les distinguer, il suffit de regarder un objet dont les faces sont de couleurs ou de formes différentes. Ainsi, une personne placée entre les deux glaces et en face d'une d'elles sera vue alternativement de dos ou de face dans chacune d'elles.



Fig. 43. — Miroirs à angle droit.

Deux miroirs plans formant un angle donnent des images dont le nombre est limité et dépend de la grandeur de l'ouverture. Mais toutes se trouvent placées sur un cercle ayant pour centre un point de la ligne d'intersection des miroirs et pour



Fig. 44. — Images dans deux miroirs inclinés à 60°.



Fig. 45. — Images dans deux miroirs inclinés de 45°.

rayon la distance du point lumineux. Les figures 42 et 43 donnent les trois images formées par deux miroirs inclinés à 90°. Dans les deux figures suivantes, on voit comment le nombre des images s'élève à cinq ou à sept, selon que les deux miroirs sont inclinés à 60° ou à 45°.

Le *miroir magique* n'est autre chose qu'une combinaison de deux miroirs plans inclinés de façon à réfléchir les images d'objets séparés du spectateur par des obstacles. On s'en est servi, sous le nom de *polémoscope*, pour observer dans un siège les mouvements extérieurs de l'ennemi, tout en restant abrité derrière un parapet (fig. 46). Le polémoscope que représente la figure est tout simplement formé de deux miroirs parallèles, inclinés tous deux à 45° sur l'horizon, et pouvant se mouvoir



Fig. 46. — Polémoscope.

en glissant entre des châssis. Le plus élevé fait face à la région que veut explorer l'observateur, et le plus bas est celui dans lequel se reproduit l'image de cette région, image qui arrive ainsi à l'œil après deux réflexions successives.

Aujourd'hui on nomme miroirs magiques des miroirs métalliques d'origine japonaise ou chinoise, que nous décrirons dans les *Applications de l'optique*.

Les réflexions multiples entre des miroirs inclinés ont suggéré la construction de divers instruments ou appareils, au

nombre desquels nous signalerons le *kaléidoscope*, inventé par Brewster.

Dans un tube de carton sont disposées trois lames de miroir formant un prisme équilatéral dont la base est fermée par deux lames parallèles, l'une de verre transparent, l'autre de verre dépoli, entre lesquelles on place de petits objets, par exemple des fragments de verre de diverses couleurs. L'œil, en regardant par le petit bout de cette espèce de lunette, voit directement ces morceaux de verre, dont les images multiples se forment par



Fig. 47. — Images symétriques formées dans le kaléidoscope.

réflexion sur les trois miroirs. Il en résulte des figures régulièrement disposées qu'on fait varier à volonté, en tournant l'instrument sur son axe et en déplaçant ainsi les fragments colorés (fig. 47).

Dans le kaléidoscope primitif de Brewster, il n'y avait que deux miroirs, et l'on donne ordinairement le nom de *caisse catoptrique* à l'instrument qui en contient trois ou un plus grand nombre.

On voyait, il y a quelques années, sur le quai du Louvre un pauvre diable qui montrait aux spectateurs ébahis la façade de l'Institut au travers d'un énorme pavé. La *lunette magique* qui

permettait ainsi à la vue de percer les corps opaques était composée de deux tubes séparés par la pierre ; mais ces deux morceaux étaient réunis par un tube doublement coudé conte-

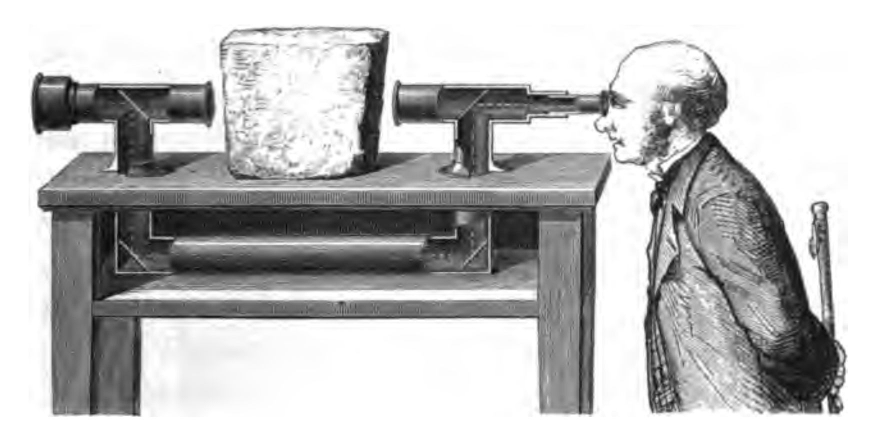


Fig. 48. — Lunette magique.

nant quatre miroirs plans inclinés à 45°, comme le montre la figure 48. Les rayons lumineux pouvaient donc, en suivant cette ligne brisée, tourner l'obstacle et parvenir à l'œil.

§ 5. IMAGES DANS LES MIROIRS COURBES. — MIROIRS SPHÉRIQUES CONCAVES ET CONVEXES.

Lorsque la lumière, au lieu de se réfléchir sur une surface plane, vient à tomber sur une surface courbe polie, les lois de sa réflexion restent les mêmes pour chaque point de ce miroir, c'est-à-dire que les angles de réflexion et d'incidence sont toujours égaux, de part et d'autre de la perpendiculaire au plan tangent en ce point, ou, comme on dit, de la normale à la surface au point d'incidence : de plus, le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale sont dans le même plan. Mais la courbure de la surface modifie la convergence ou la divergence des faisceaux lumineux qui, après la réflexion, viennent tomber dans l'œil : de là des phénomènes particuliers, de là, pour les objets lumineux, formation d'images, dont la distance et la position

varient avec la forme des miroirs, avec leurs dimensions et la distance des objets eux-mêmes.

Étudions d'abord ceux de ces phénomènes qui sont dus à la réflexion de la lumière sur la surface des miroirs de forme sphérique.

Une sphère métallique creuse, dans laquelle on coupe par un plan une calotte d'une certaine étendue, donne un miroir sphérique *concave*, si c'est la surface concave qui est polie, et un miroir sphérique *convexe*, si l'on a poli la surface extérieure. Si le fragment sphérique est un morceau de verre étamé, la couche de tain est extérieure pour un miroir concave, et intérieure pour un miroir convexe. Mais nous avons dit déjà pourquoi il est préférable d'employer les miroirs en métal, ou en toute autre substance opaque et polie, pour l'observation des phénomènes. Nous ne parlerons donc pas ici des autres, qui ne différeraient des premiers que par la production d'images multiples; il suffira de se reporter, sur ce dernier point, à ce qui a été dit plus haut des images multiples produites par les deux surfaces réfléchissantes des miroirs étamés.

Voyons ce qui se passe lorsqu'on présente un objet lumineux, la flamme d'une bougie je suppose, à des distances diverses d'un miroir concave. Nous supposerons, dans ces expériences, qu'on place le point lumineux sur l'*axe de figure* du miroir, c'est-à-dire sur la ligne indéfinie qui joint le centre de la sphère à laquelle il appartient, au point milieu ou au sommet de la calotte sphérique.

Plaçons d'abord la bougie à une distance du miroir plus grande que le rayon de courbure. Il sera facile, à l'aide d'un écran translucide recevant les rayons réfléchis, de voir qu'il se forme une image renversée de l'objet et plus petite que lui, en un point de l'axe compris entre le centre de la sphère et la moitié du rayon (fig. 49). En éloignant le point lumineux du miroir, il faut, pour recevoir l'image, rapprocher de plus en plus l'écran du point qu'on nomme le foyer principal du miroir (nous verrons bientôt pourquoi) et l'on voit que l'image toujours

renversée diminue de plus en plus. Si l'on ramène la bougie sur ses pas, de sa position actuelle jusque vers le centre, on observe que l'image, toujours renversée et toujours plus petite que l'objet, grandit de plus en plus en se rapprochant du centre. Si la bougie arrive au centre, l'image y arrive en même temps et se confond avec elle, en position et en grandeur. Maintenant continuons à rapprocher la bougie du miroir; nous ver-



Fig. 49. — Miroir concave. Image renversée, plus petite que l'objet.

rons l'image passer au delà du centre, s'en éloigner de plus en plus en grandissant sans cesse, d'ailleurs toujours renversée (fig. 50). A mesure que l'objet approche du foyer principal, l'image grandit en s'éloignant sur l'axe, mais de plus en plus diffuse, et il n'est bientôt plus possible de la recevoir sur l'écran. Quand la bougie arrive au foyer, l'image est à l'infini; elle s'est complètement évanouie.

Jusqu'ici, l'image de l'objet lumineux a toujours été réelle,

c'est-à-dire qu'il existe réellement dans l'air, au point où elle se

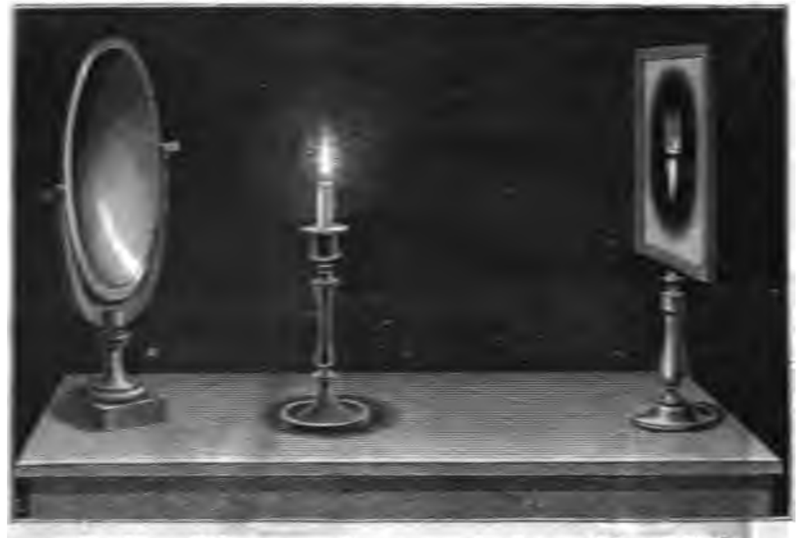


Fig. 50. — Miroir concave. Image renversée, plus grande que l'objet.

forme, des faisceaux lumineux dont la réunion reproduit, matériellement pour ainsi dire, la forme et la couleur de l'objet. Aussi avons-nous pu recevoir cette image sur un écran. Il n'en est plus de même, si l'on approche l'objet lumineux du miroir à une distance moindre que le foyer principal. Alors il n'existe plus d'image réelle; mais l'œil aperçoit derrière le miroir, comme dans les miroirs plans, une image de la bougie : c'est ce qu'on nomme alors une *image virtuelle*. Elle est droite, plus grosse que l'objet, comme le montre la figure 51 ; et d'ailleurs ses dimensions



Fig. 51. — Miroir concave. Image virtuelle, droite et plus grande que l'objet.

apparentes vont en diminuant à mesure qu'on approche la bougie du miroir. Elle aurait les dimensions de l'objet même, si celui-ci touchait la surface réfléchissante.

Ces derniers phénomènes peuvent être observés aisément à l'aide des miroirs concaves dont on se sert pour la toilette, et dont la courbure est calculée de telle sorte qu'à une petite distance du miroir l'observateur se trouve dans la dernière des positions que l'expérience précédente vient de décrire : dans ce cas, il aperçoit sa figure plus ou moins grossie. En s'éloignant à des distances de plus en plus grandes, il verra se reproduire, dans un ordre inverse, les phénomènes indiqués.

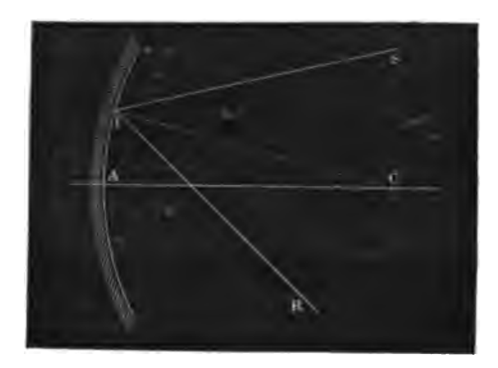


Fig. 52. — Marche d'un rayon lumineux à la surface d'un miroir concave.

Voyons maintenant comment les lois de la réflexion de la lumière rendent compte des principales circonstances qui caractérisent les phénomènes dont nous venons de faire la description.

Pour cela, commençons par déterminer la marche d'un rayon lumineux qui tombe en un point de la surface d'un miroir concave, et s'y réfléchit. Deux cas peuvent se présenter : ou le rayon incident passe par le centre de courbure du miroir, ou il passe à une distance quelconque de ce centre. Dans le premier cas, l'incidence est normale, et le rayon réfléchi doit l'être également, c'est-à-dire que le rayon de lumière revient sur ses pas, suit après la réflexion la marche qu'il avait auparavant, et dès lors retourne dans l'espace en passant une seconde fois par le centre. Dans le second cas, soit C le centre du miroir, SI le rayon incident (fig. 52). Si nous menons le rayon de la sphère IC, c'est dans le plan SIC qu'aura lieu la réflexion, puisque ce plan est normal au miroir. De plus, la direction du rayon réfléchi IR sera telle qu'il y ait égalité entre les deux angles SIC et CIR.

Ces deux règles suffisent pour trouver les positions relatives de tous les rayons ou faisceaux lumineux incidents et réfléchis, quelle que soit d'ailleurs leur situation relativement au miroir.

Par exemple, la figure 53 nous montre un faisceau de lumière formé de rayons parallèles à un axe principal CA du miroir concave. Cela revient à supposer que ces rayons émanent d'un point lumineux, situé sur l'axe à une distance infinie, ou du moins assez considérable pour qu'on puisse la considérer comme telle. C'est le cas de la lumière qui vient du Soleil, des étoiles, ou même, à la surface de la Terre, d'un objet suffisamment éloigné par rapport au rayon de courbure du miroir.



Fig. 53. — Miroir concave. Marche et réflexion des rayons parallèles à l'axe. Foyer principal.

La géométrie et l'observation s'accordent alors à démontrer que tous les rayons réfléchis viennent couper l'axe principal en un même point, situé à égale distance entre le centre C et le sommet A du miroir. Leur réunion produit en F, foyer principal, une image du point que l'œil apercevra au même endroit, puisque le faisceau divergent qui pénètre dans notre organe produira le même effet que si un objet lumineux réel, situé au foyer, nous envoyait le même faisceau. Le phénomène est réalisé avec d'autant plus de rigueur que l'ouverture du miroir est plus petite, c'est-à-dire que l'angle du cône ayant son sommet au centre C du miroir et pour base le miroir même est plus petit. Il ne faut pas que cet angle dépasse 8 à 10 degrés.

Du reste, le miroir étant sphérique, la courbure est la même en chacun de ses points : les rayons réfléchis suivront donc une marche semblable par rapport aux axes secondaires, c'est-à-dire aux lignes droites indéfinies qui joignent chaque point du miroir au centre. Il y a donc une infinité de foyers secon-

daires sur ces axes, situés, comme le foyer principal, à égale distance entre le centre et le miroir.

Les figures 54 et 55 donnent la marche des rayons lumineux, quand le point lumineux est toujours situé sur l'axe, à une distance du miroir qui n'est pas infinie. Dans cette hypothèse, le faisceau lumineux est formé de rayons qui ne sont plus parallèles et qui tombent sur le miroir en formant avec sa surface différents angles. Trois cas peuvent se présenter alors, selon que le point lumineux est au delà du centre du miroir, entre le centre et le foyer, ou bien entre le foyer et le miroir. Dans tous ces cas, on démontre géométriquement que les rayons réfléchis vont converger en un même point de l'axe principal, où ils se réunissent en faisceau, et que ce point est précisément celui où l'expérience nous a fait voir que se formaient les images.

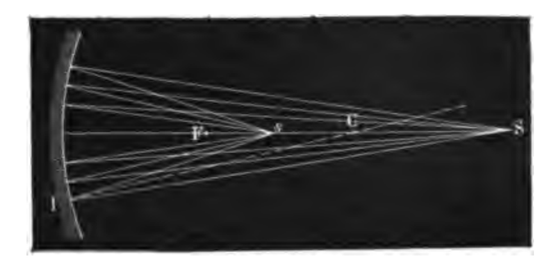


Fig. 54. — Miroirs concaves. Foyers conjugués.

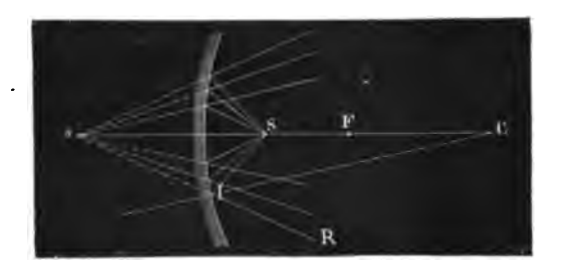


Fig. 55. — Miroir concave. Foyer virtuel.

Par exemple, si le point lumineux est en S (fig. 54) au delà du centre du miroir, un rayon SI se réfléchit en I*s* et coupe l'axe entre le centre et le foyer ; tous les autres rayons lumineux viennent, après s'être réfléchis, passer par ce même point *s*, où ils forment une image du point S. Ce dernier point vient-il au centre même, les rayons tombent normalement sur le même miroir, et reprennent en se réfléchissant la route qu'ils suivaient d'abord ; le point lumineux et son foyer se confondent au centre du miroir. Si le point s'approche

encore du miroir, mais à une distance moindre que le foyer principal, la réflexion a lieu sur l'axe au delà du centre.

Passons maintenant au cas où le point lumineux est en *s*, entre le centre C et le foyer principal (fig. 54). Il est bien évident alors qu'un quelconque des rayons incidents *s*I se réfléchira dans la direction IS, et que tous les autres iront couper l'axe au même point S, où aura lieu leur convergence. L'image d'un point situé entre le centre du miroir et le foyer principal doit donc se faire sur l'axe au delà du centre : c'est aussi ce que l'expérience confirme, nous l'avons vu plus haut.

Ce résultat prouve — et l'on pouvait le prévoir — que si un faisceau incident partant d'un point de l'axe S donne lieu à un faisceau réfléchi qui converge en un autre point de l'axe *s*, à son tour un faisceau incident, qui part de ce dernier point, va converger, après sa réflexion sur le miroir, précisément au point d'où émanait le premier faisceau. En un mot, le chemin parcouru dans un sens par un rayon de lumière qui tombe en un point du miroir et s'y réfléchit, est parcouru dans un sens précisément inverse par un rayon de lumière qui tombe au même point, si la direction d'incidence du second rayon coïncide avec la direction de réflexion du premier.

Les deux points S et *s* sont donc alternativement des foyers l'un pour l'autre : aussi les nomme-t-on des *foyers conjugués*. Le foyer conjugué du foyer principal est à l'infini, ce qui est une manière de dire que les faisceaux émanés de ce point sont renvoyés parallèlement à l'axe du miroir.

Quand le point lumineux S est entre le foyer et le centre du miroir, un rayon incident SI se réfléchit en IR, c'est-à-dire s'éloigne de l'axe (fig. 55). Il n'y a donc plus convergence des rayons qui composaient le faisceau lumineux, et, par suite, plus d'image réelle : ce que l'expérience nous avait appris déjà. Toutefois on démontre qu'en prolongeant derrière l'axe les rayons réfléchis, ils s'y coupent en un point *s*, formant ainsi un foyer que, par opposition au foyer réel des cas précédents, on nomme *foyer virtuel*. Et, en effet, un spectateur placé au devant du

miroir a toujours la sensation d'une image, parce que les rayons divergents pénètrent dans l'œil de l'observateur en suivant la même marche que s'ils émanaient réellement du point *s*. L'image est alors virtuelle, tout comme l'image vue dans un miroir plan.

Si l'on a bien compris quelle est la marche d'un faisceau lumineux qui tombe sur la surface d'un miroir concave, et comment, après sa réflexion, il donne lieu à un faisceau réfléchi, convergent ou divergent, selon la position du point lumineux, il sera facile de se rendre compte de la production des images des objets, images tantôt réelles, tantôt virtuelles, tantôt plus grandes, tantôt plus petites que les objets eux-mêmes, enfin tantôt droites, tantôt renversées. On en voit deux exemples dans les figures 56 et 57.

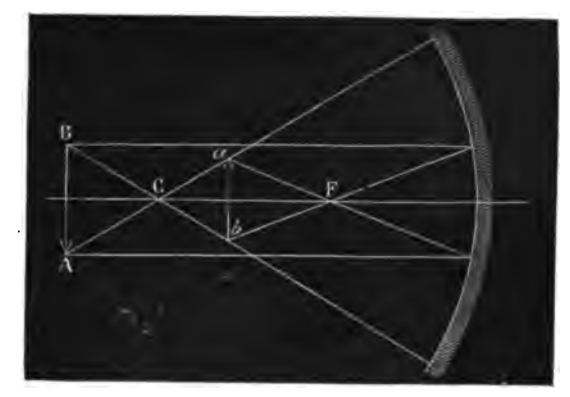


Fig. 56. — Miroir concave. Images réelles et renversées des objets.

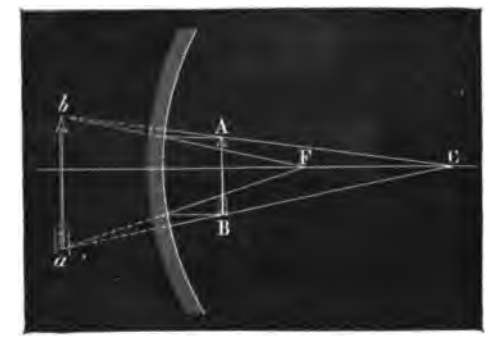


Fig. 57. — Miroirs concaves. Image droite et réelle des objets.

Voici quelles sont les règles de la construction géométrique des images, et comment on peut se rendre compte de leurs positions et de leurs dimensions comparées à celles de l'objet. On cherche d'abord les images de chaque point extrême A, B. On joint, dans ce but, chacun de ces points au centre du miroir : cela donne les lignes AC, BC, qui sont les axes secondaires; puis on mène

les rayons parallèles à l'axe principal, qui, comme on l'a vu, doivent se réfléchir au foyer F. Les points de rencontre des rayons réfléchis avec l'axe secondaire correspondant donnent *a* et *b*, qui sont les foyers des points A et B, c'est-à-dire les points où vont se former les images des extrémités de l'objet.

Dans les miroirs convexes, les foyers et les images sont tou-



Fig. 58. — Image droite virtuelle dans les miroirs sphériques convexes.

jours virtuels, parce que les rayons dont se compose le faisceau lumineux incident, divergent toujours après leur réflexion, comme on peut s'en rendre compte si l'on suit la marche de l'un d'entre eux. On voit aussi (fig. 59) comment il se fait que, dans ces miroirs, l'image est droite, mais toujours plus petite que l'objet. Les dimensions sont d'ailleurs d'autant moindres que la distance de l'objet au miroir est plus grande. Si l'ouverture du miroir est très grande, on observe une déforma-

tion qui est d'autant plus sensible que cette ouverture est plus considérable. Tout le monde peut s'assurer de ce fait en regardant une boule polie semblable à celle que représente la figure 59. On place ordinairement dans les jardins ces sortes de miroirs sphériques (ce sont des globes en verre étamés intérieurement, ou encore en verre noir, qu'on nomme *globes périscopiques*), à la surface desquels on voit se refléter tout le paysage d'alentour.

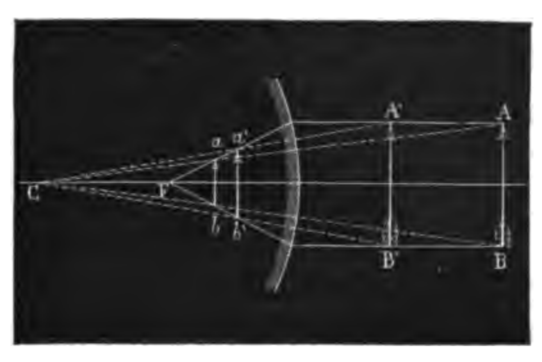


Fig. 59. — Miroir convexe. Image droite et virtuelle.

On considère encore en optique les miroirs paraboliques concaves, qui ont la propriété de concentrer les rayons parallèles à l'axe de la parabole au foyer de cette courbe, quelle que soit l'ouverture du miroir, et qui renvoient de même, en faisceaux parallèles, toute la lumière d'un objet lumineux situé au foyer. Les miroirs sphériques ne donnent ce résultat qu'autant qu'ils ont une très petite ouverture.

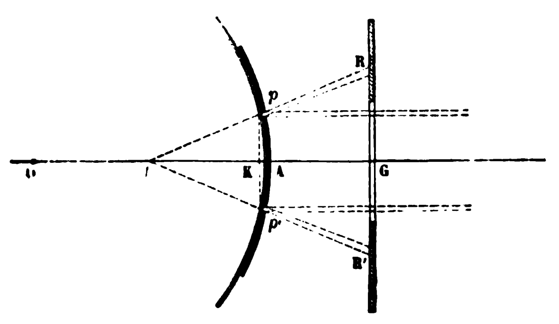


Fig. 60. — Détermination de la distance focale d'un miroir convexe.

Pour résoudre les divers problèmes relatifs aux miroirs sphériques convexes ou concaves, il faut connaître leur rayon de courbure, c'est-à-dire le rayon de la sphère à laquelle ils appartiennent. Ce rayon, on l'a vu, est double de la distance focale. La question revient donc à déterminer expérimentalement la position du foyer. Pour un miroir concave, cela est aisé : en l'exposant aux rayons solaires, et en recevant l'image sur un

écran, on trouve bientôt la position pour laquelle cette image a les plus petites dimensions possibles : alors la distance focale est celle de l'écran au miroir.

Si le miroir est convexe, on en recouvre la surface d'une feuille de papier noir où l'on a percé deux trous *p* et *p'*. On tourne alors le miroir vers le soleil, et à l'aide d'un écran percé d'une ouverture convenable on cherche la position pour laquelle l'intervalle des deux traces R et R' des faisceaux réfléchis par les points *p* et *p'* est double de la distance de ces points. Alors la distance GA de l'écran au miroir est égale à la distance focale. C'est ce qu'il est aisé de prouver sur la figure par la comparaison des triangles semblables F*pp'* et FRR'.

Quand on examine quelle est, pour un miroir sphérique, la marche des rayons réfléchis provenant d'un point lumineux situé sur l'axe à une distance quelconque, on reconnaît que ces rayons se coupent successivement, d'abord sur l'axe même en ses différents points, puis en dehors de l'axe, de telle sorte que les points d'intersection forment une surface que les géomètres nomment *caustique*. En tous les points de cette surface, la lumière se trouve accumulée plus que partout ailleurs, et sa concentration maximum est au foyer du point donné. La caustique varie de forme avec la position et la distance du point lumineux ; mais il est possible d'en constater l'existence d'une façon expérimentale.

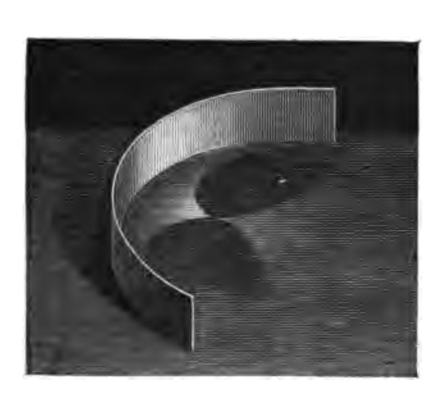


Fig. 61. — Caustique par réflexion.

On emploie dans ce but un écran en carton blanc, découpé de telle sorte qu'il épouse la forme du miroir en passant par son centre. Exposé ainsi à la lumière du Soleil ou à celle d'une lampe, on aperçoit en certaines parties de l'écran une lumière plus vive dont les contours indiquent la forme de la

caustique, qui est évidemment la même quelle que soit la position de l'écran autour du centre. Une lame circulaire de métal, intérieurement polie, posée sur un plan, indiquerait de même la forme de cette courbe, pour un miroir cylindrique (fig. 61). Cette expérience est due à Brewster.



Fig. 62. — Caustique par réflexion.

Quand on expose aux rayons du soleil un verre plein de lait, ou mieux, comme le dit J. Herschel, plein d'encre, on aperçoit à la surface du liquide une ligne courbe brillante ayant un point de rebroussement au foyer : c'est l'intersection de la caustique du miroir cylindrique concave que forme le verre avec le plan qui limite le liquide à la surface supérieure (fig. 62).

§ 6. IMAGES DANS LES MIROIRS CYLINDRIQUES OU CONIQUES. — ANAMORPHOSE.

Les miroirs cylindriques convexes ou concaves produisent des images où les dimensions des objets ne sont pas altérées dans le sens de la longueur du cylindre ou de ses arêtes, mais qui le sont au contraire dans une direction perpendiculaire à la première, c'est-à-dire suivant les circonférences des sections normales. Les rayons réfléchis le long d'une même arête suivent la marche qu'ils prendraient dans un miroir plan; ceux qui se réfléchissent sur la même circonférence suivent le chemin que leur donnerait la réflexion sur un miroir sphérique. Si le cylindre est convexe, l'image sera toujours rétrécie dans sa largeur; s'il est concave, elle sera tantôt rétrécie, tantôt élargie, selon la distance de l'objet au miroir.

Dans les miroirs coniques convexes, les images produites par réflexion sont déformées dans le sens des circonférences, et comme le degré de courbure change de la base au sommet, il en résulte dans les dimensions un rétrécissement d'autant plus considérable qu'on approchera plus du sommet. Si la surface conique était concave, la forme de l'image serait pyramidale, mais pour certaines positions de l'objet elle serait élargie.

Dans les uns et les autres de ces miroirs, la réflexion des

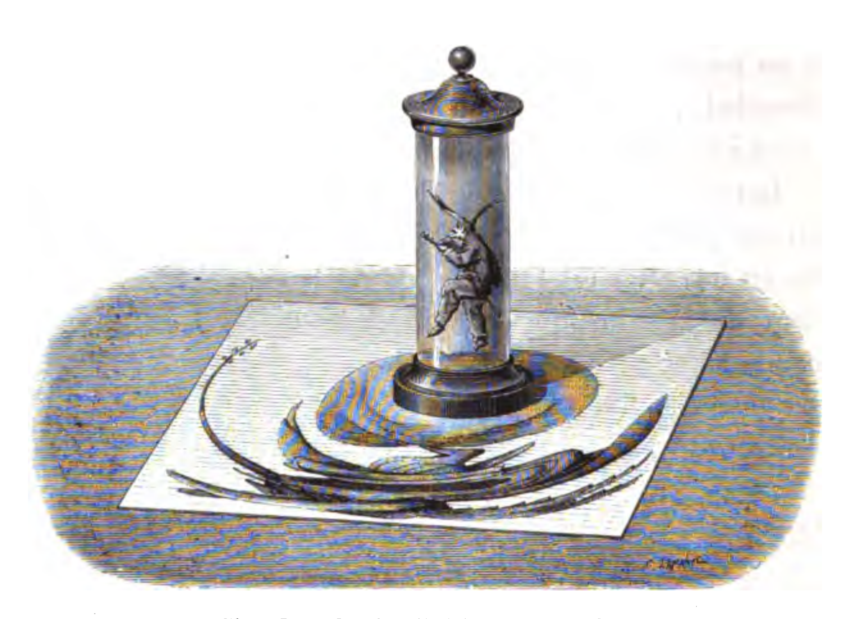


Fig. 63. — Miroir cylindrique Anamorphose.

rayons lumineux s'opère toujours suivant les lois rigoureuses que nous avons constatées ; de sorte qu'on a pu construire des dessins bizarres et difformes, et où l'œil n'aperçoit plus aucune figure déterminée, et tels cependant que, réfléchis dans des miroirs cylindriques et coniques, leurs images soient une représentation fidèle d'objets connus. On donne le nom d'*anamorphose* à ce renversement de formes. On trouve chez les opticiens des tableaux dont les lignes et les couleurs ont été combinées pour produire des images régulières de paysages,

de personnages, d'animaux, etc., quand on place au centre du

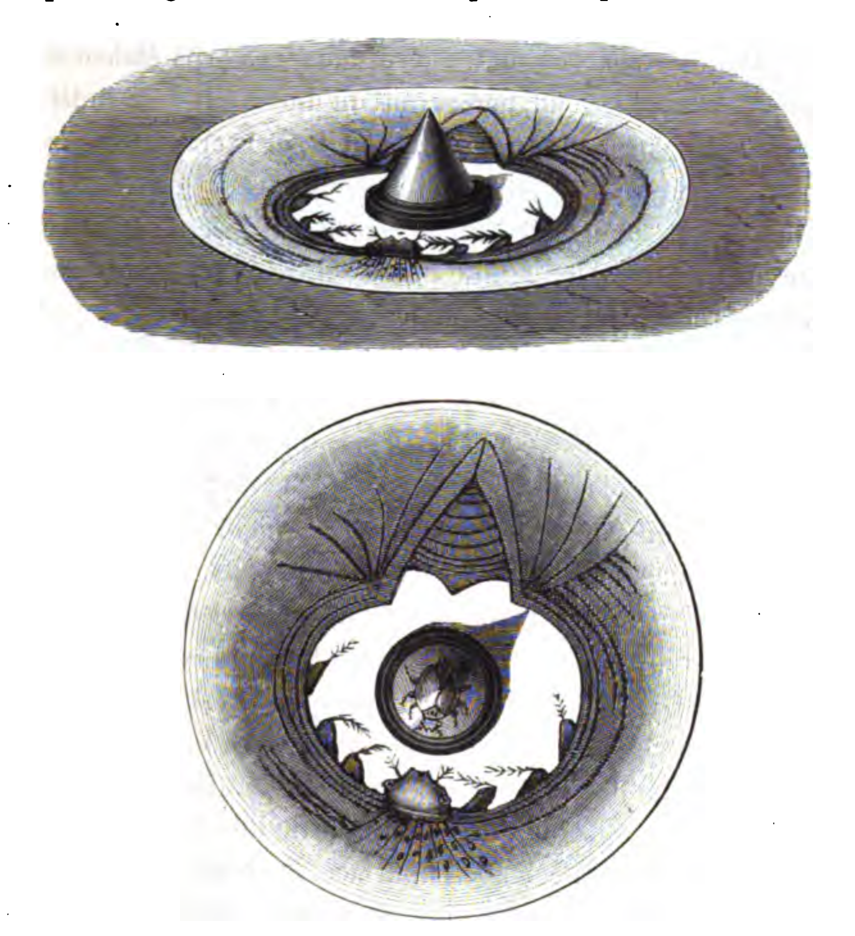


Fig. 64 et 65. — Réflexion sur les miroirs coniques. Anamorphose.

tableau le miroir cylindrique ou conique, pour lequel il a été construit (fig. 64, 65 et 66).

§ 7. LUMIÈRE IRRÉGULIÈREMENT RÉFLÉCHIE OU LUMIÈRE DIFFUSE.

Nous n'avons considéré jusqu'ici que la lumière réfléchie régulièrement à la surface des corps polis ; et les phénomènes auxquels donne lieu cette réflexion montrent assez, comme nous l'avons déjà dit plus haut, que si le degré de poli était parfait, le corps réfléchissant serait invisible pour nous. On y

verrait l'image plus ou moins déformée des objets lumineux qui entourent ce corps, on ne le verrait pas lui-même. Et si, à l'exception des sources de lumière, tous les corps étaient dans le même cas, l'œil ne percevrait qu'une multitude indéfinie d'images des corps lumineux, du Soleil par exemple, sans voir rien autre chose. Dans une chambre obscure, si l'on fait tomber les rayons solaires sur un miroir, la surface de ce dernier donne une image éblouissante du Soleil, mais les autres points du corps réfléchissant ne sont légèrement visibles que par la faible fraction de la lumière qui est irrégulièrement réfléchie à sa surface. C'est cette lumière diffuse qui permet d'apercevoir le miroir de tous les points de la chambre obscure[1].

La proportion de lumière spéculaire et de lumière diffuse réfléchie par un corps ne varie pas seulement avec le poli de sa surface, mais aussi avec la nature du corps, sa couleur, et enfin avec l'angle des rayons incidents. Une feuille de papier blanc mate réfléchit la lumière dans tous les sens; mais sa blancheur est d'autant plus éclatante qu'elle est exposée plus perpendiculairement à la source de lumière. Si l'observateur se place, pour examiner la surface de la feuille, dans des directions de plus en plus obliques, la proportion de lumière diffuse diminue, et par suite l'éclat de la surface. Par compensation l'œil reçoit des rayons de plus en plus nombreux réfléchis régulièrement, de sorte qu'en plaçant la flamme d'une bougie très près de la surface d'une feuille de papier, et en l'observant obliquement dans une direction opposée, on voit une image très distincte de la flamme, réfléchie comme dans un miroir (fig. 66).

Quand on dit que la lumière diffuse est de la lumière réfléchie irrégulièrement, cela ne signifie pas que les rayons dont

1. Un corps qui n'est pas lumineux par lui-même, devient donc seulement visible par la lumière diffuse que sa surface réfléchit de tous côtés. Cependant on verra plus loin qu'il est un grand nombre de substances ayant la propriété d'émettre une lumière qui leur est propre, quand elles sont exposées aux rayons d'une source lumineuse plus ou moins intense : ce sont les substances dites phosphorescentes. Peut-être tous les corps jouissent-ils de la même propriété à des degrés très différents, de sorte que leur visibilité serait en partie due à la phosphorescence, en partie à la diffusion de la lumière.

elle est composée suivent d'autres lois, en se réfléchissant, que la lumière spéculaire. L'irrégularité dont il s'agit provient des aspérités de la surface des corps mats, rugueux, qui reçoivent la lumière sous des incidences variées et la renvoient dans



Fig. 66. — Lumière réfléchie très obliquement.

toutes les directions (fig. 67). Quand on regarde très obliquement une telle surface, les aspérités se masquent les unes les autres, et les rayons émanant d'éléments parallèles à la direction générale de la surface deviennent de plus en plus nombreux : ce qui explique la proportion croissante de la lumière régulièrement réfléchie.

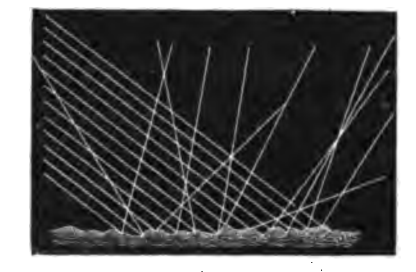


Fig. 67. — Réflexion irrégulière de la lumière à la surface d'un corps non poli.

Que la quantité de lumière réfléchie spéculairement varie avec l'état de la surface des corps, cela n'est pas douteux. Un morceau de verre poli devient un miroir ; dépoli, il ne renvoie presque que de la lumière diffuse. Le bois, le marbre, la corne, une multitude d'autres substances sont dans le même cas. Mais le *pouvoir réflecteur*, en donnant ce nom à la propriété de réfléchir spéculairement la lumière en plus ou moins grande proportion, varie, à degré égal de poli, avec la nature des substances

et avec l'angle d'incidence. Sur cent rayons reçus par l'eau, le verre à glace, le marbre noir poli, le mercure, le métal des miroirs, sous une incidence de 50°, l'eau en réfléchit 72, le verre 54, le marbre 60 et le mercure et le métal des miroirs 70. Si l'incidence augmente, le nombre des rayons réfléchis diminue pour les trois premiers corps dans une progression rapide, et n'est plus que de 2 ou 3 au plus entre 60° et 90°; tandis que sous cette dernière incidence le mercure réfléchit encore 69 rayons sur 100.

Les corps de couleur sombre ne réfléchissent que peu de lumière. Le noir de fumée ne renvoie pas de lumière diffuse et une faible quantité de lumière spéculaire.

Quand la réflexion de la lumière se fait sur une surface polie, mais transparente, les images se produisent encore, mais elles sont très affaiblies, une grande partie de la lumière incidente traversant la substance. Voilà pourquoi les miroirs et les glaces ordinaires sont étamés sur leur face postérieure, et alors les images très vives qui se font sur la couche métallique opaque d'un grand poli, éteignent par leur éclat les faibles images produites par la réflexion sur la face antérieure du verre.

Mais les glaces sans tain peuvent être employées et donner des images très colorées et très brillantes, quand les objets qu'elles reflètent sont vivement éclairés, et qu'en même temps l'espace qui les entoure, plongé dans une obscurité relative, reçoit peu ou point de lumière diffuse. Tel est le principe des apparitions fantastiques connues au théâtre sous le nom de *spectres*, et qu'on a, récemment encore, utilisées avec succès dans les drames. Nous en dirons deux mots dans les *Applications de l'optique*.

CHAPITRE V

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

§ 1. PHÉNOMÈNES DE RÉFRACTION.

Nous avons vu dans les chapitres précédents qu'un faisceau lumineux se propage suivant une direction rectiligne dans un milieu homogène; que si, sans sortir de ce milieu, il vient à rencontrer la surface d'un corps, une partie plus ou moins considérable des rayons qui composent le faisceau primitif est renvoyée ou réfléchie dans le milieu d'où il était parti, en suivant, pour sa direction nouvelle, les lois de la réflexion. Nous allons maintenant examiner le cas où le faisceau lumineux passe d'un milieu homogène dans un autre milieu également homogène, mais différent de nature et notamment de densité.

Faisons arriver dans la chambre obscure un faisceau de lumière solaire, et disposons sur son trajet une cuve rectangulaire pleine d'eau et dont les parois soient des lames de verre transparentes. L'eau et l'air renfermant toujours des particules de poussière en suspension, le chemin suivi par le faisceau se verra aisément dans l'obscurité.

Si la direction des rayons lumineux est normale ou perpendiculaire à la face de la cuve, on remarquera que sa trajectoire sera tout entière rectiligne : le faisceau qui a dans l'air la direction AS (fig. 68) entrera dans l'eau sans dévier, suivra le chemin AB, prolongement du chemin dans l'air, et sortira de même par la face opposée. Les trois lignes AS, AB et CB seront une seule et même ligne droite.

Si, au contraire, on fait arriver le faisceau lumineux obliquement (fig. 69), on observera une déviation, le faisceau AS se rapprochant de la normale à son entrée dans l'eau, puis s'en écartant au contraire à sa sortie, de telle sorte que le chemin CB suivi dans l'air, après le passage à travers la cuve, reste parallèle à la direction primitive.

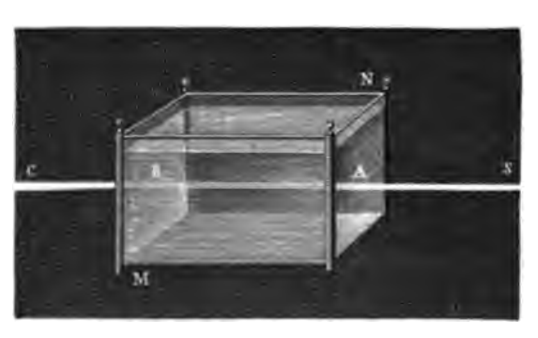


Fig. 68. — Incidence normale; absence de déviation.

Cette déviation subie par la direction d'un rayon lumineux dans son passage d'un milieu dans un autre est ce qu'on nomme la *réfraction de la lumière*. On appelle *milieux réfringents* ceux qui donnent lieu aux phénomènes de réfraction. Nous verrons bientôt que ces phénomènes sont plus complexes que ne le ferait supposer l'expérience qu'on vient de décrire ; ils sont le plus souvent accompagnés d'effets de coloration que nous étudierons à part sous le nom de phénomènes de *dispersion*. D'autre part, il est des milieux réfringents dans lesquels le faisceau se divise en deux parties séparées, l'une qui suit les lois de la réfraction ordinaire ou *simple*, l'autre qui est soumise à d'autres lois. On dit alors qu'il y a *double réfraction*.

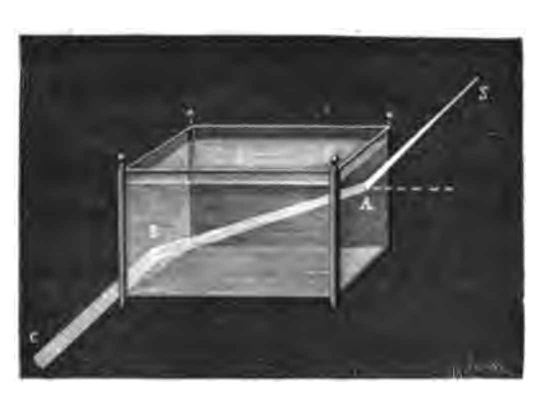


Fig. 69. — Incidence oblique. Réfraction.

Nous allons en premier lieu nous occuper de la réfraction simple, et décrire quelques-uns des effets qu'elle produit sur l'apparence des objets vus au travers des milieux réfringents

Lorsqu'on plonge un bâton droit dans une eau transparente, il semble que la portion vue à travers le liquide (fig. 70) n'est pas la continuation en ligne droite de la partie extérieure. Le bâton paraît brisé à partir de la surface de l'eau, et le bout qui plonge est en apparence relevé, comme s'il avait diminué de longueur, ou que l'eau en cet endroit fût moins profonde. Si le bâton est placé verticalement, ou si l'œil reçoit les rayons visuels dans une direction qui le lui fasse voir comme s'il était vertical, le bâton ne semble plus brisé, mais simplement raccourci.



Fig. 70. — Phénomènes de réfraction. Bâton brisé.

On peut vérifier aisément ce phénomène, en plongeant dans un vase plein d'eau limpide l'extrémité d'un crayon. Si, avant de remplir le vase du liquide transparent, on en observe, d'une position fixe, le fond par-dessus les bords antérieurs, et qu'ensuite, sans changer l'œil de place, on verse l'eau progressivement, on voit les contours du fond s'élever peu à peu, à mesure que croît la profondeur du liquide, et apparaître enfin beaucoup plus élevés que la simple perspective dans l'air ne l'indiquait d'abord. Pour rendre l'expérience plus sensible, on n'a qu'à fixer à l'aide d'un peu de cire une pièce de

monnaie en un endroit du fond que les bords du vase cachent entièrement; puis on verse le liquide. A mesure que le niveau de l'eau monte, l'objet, redevenu visible, semble monter avec lui et prendre la position apparente qu'indique la figure 71. Il n'est personne qui n'ait pu remarquer nombre d'effets analogues. Par exemple, les objets vus par transparence à travers une carafe pleine d'eau apparaissent grossis, déformés, déplacés de leur position réelle. En suivant les mouvements des poissons que l'on élève dans des vases en verre de forme sphérique, on est étonné de voir ces animaux, tantôt disparaître, tantôt grossir démesurément, tantôt diminuer peu à peu, jusqu'à n'avoir plus pour l'œil que leurs dimensions réelles.



Fig. 71. — Élévation apparente du fond d'un vase par la réfraction.

Tous ces phénomènes sont dus à la *réfraction de la lumière*, c'est-à-dire à la déviation que les rayons lumineux éprouvent en passant d'un milieu dans un autre, par exemple de l'air dans l'eau.

Des phénomènes semblables ont lieu non seulement dans toute espèce de liquides, mais dans les solides transparents comme le verre, et pareillement dans tous les gaz; de plus, comme nous le verrons plus loin, la quantité de la déviation varie non seulement avec l'obliquité de la lumière au moment où elle change de milieu, mais aussi avec la nature et la densité des milieux différents.

Il y a longtemps qu'on a constaté les principaux effets de la réfraction de la lumière, et l'apparence des objets à travers

une eau limpide a certainement été observée de toute antiquité[1]. Les anciens astronomes, Ptolémée par exemple, connaissaient la réfraction atmosphérique, c'est-à-dire la déviation que subissent les rayons lumineux émanés des astres en passant du vide des espaces planétaires dans les couches de plus en plus denses de notre atmosphère. Mais ce n'est qu'au commencement du dix-septième siècle qu'un jeune géomètre hollandais, Willebrod Snell, découvrit les lois que suit un rayon lumineux, lorsqu'il passe d'un milieu homogène dans un autre. Ces lois portent quelquefois le nom de Descartes, parce que ce grand homme les découvrit à son tour, ou du moins les exprima sous une forme qui est demeurée dans la science.

§ 2. LOIS DE LA RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

Un rayon ou faisceau lumineux se propage d'un milieu dans un autre. Il arrive en un point de leur surface de séparation, en faisant, avec la ligne perpendiculaire ou normale à cette surface, un certain angle qu'on nomme *angle d'incidence*. Il pénètre dans le second milieu, et continue sa route en ligne droite, mais il suit une direction plus ou moins éloignée de la première : le rayon dévié fait avec la normale un angle, qu'on nomme *angle de réfraction*, et qui, en général, n'est pas égal à l'angle d'incidence. Dans quel rapport sont ces deux angles?

1. L'expérience du vase qu'on remplit d'eau et dont le fond parait s'élever progressivement, se trouve déjà mentionnée dans Euclide ; Aristote fait observer que les rames semblent brisées au sortir de l'eau. Sénèque, dans le livre I des *Questions naturelles*, rapporte avec plus ou moins d'exactitude quelques-uns des effets de la réfraction. « Tous les objets, dit-il, vus à travers l'eau semblent bien plus considérables. Des caractères menus et peu distincts, lus au travers d'un globe de verre plein d'eau, sont plus gros à l'œil et plus nets. Les fruits qui nagent dans le cristal paraissent plus beaux qu'ils ne sont; les astres, plus grands à travers un nuage (?), parce que la vue d'un homme manque de prise dans un fluide, et ne peut saisir exactement les objets. Cela devient manifeste si tu remplis d'eau une coupe, et que tu y jettes un anneau; l'anneau a beau demeurer au fond, son image est répercutée à la surface. Tout ce qu'on voit à travers un liquide quelconque est beaucoup plus gros que nature. » On voit assez, par cette citation, que les anciens avaient observé les phénomènes de réfraction, mais qu'ils ne les connaissaient que grossièrement et surtout qu'ils en ignoraient les conditions et les lois.

quelle est la direction du faisceau ou rayon réfracté par rapport à celle du faisceau ou rayon incident? C'est à ces questions que répondent les énoncés des lois de la réfraction simple.

Voici comment on peut démontrer expérimentalement ces lois :

On se sert, pour cela, de l'appareil que représente la figure 72. C'est, comme on voit, un cercle gradué, au centre duquel est fixé un vase ayant la forme d'un cylindre en verre dont l'axe est horizontal et passe par le centre du cercle. On le remplit à moitié d'eau ou de tout autre liquide : si l'on place l'appareil de façon à maintenir le cercle dans un plan vertical, la surface du liquide en repos, qui est horizontale, coupera le cercle à son centre et se trouvera perpendiculaire au diamètre vertical, diamètre qui coïncide avec le zéro des divisions du limbe.



Fig. 72. — Démonstration expérimentale des lois de la réfraction.

On fait arriver alors le rayon incident, venant du Soleil par exemple, au point I d'un miroir qu'on incline de manière à réfléchir le rayon dans la direction du centre O du cercle à travers le petit trou d'un diaphragme fixé, ainsi que le miroir, à une alidade mobile autour du centre. Le rayon traverse la paroi cylindrique en verre, atteint la surface de l'eau, puis pénètre alors dans le liquide, d'où il sort par le contour du cylindre de verre. Voici maintenant ce que l'on constate :

Si le rayon lumineux incident est entré dans le liquide selon

la direction de la verticale, il sort sans déviation, comme on peut s'en assurer en le recevant au centre d'un autre diaphragme fixé à une seconde alidade mobile. Ainsi, premièrement, il n'y a pas de réfraction pour une incidence normale.

Fait-on varier l'angle d'incidence, on trouve que l'angle de réfraction, ici toujours plus petit que le premier, varie; mais, dans tous les cas, dans toutes les positions de l'alidade par laquelle arrive le rayon incident, le rayon réfracté, après la sortie du cylindre, sortie qui se fait sans déviation nouvelle, coïncide toujours en direction avec l'axe de la seconde alidade. Ce résultat démontre la seconde loi[1], dont voici l'énoncé :

Quand un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre, il se brise, et le rayon incident et le rayon réfracté restent dans un même plan perpendiculaire ou normal à la surface de séparation des milieux.

Il s'agit maintenant de trouver la loi de variation des angles de réfraction et d'incidence. A l'aide de la première alidade, munie d'une pointe à son extrémité opposée, on a la direction du rayon incident, et l'on peut mesurer la ligne *oa* sur une règle divisée horizontale, susceptible de se mouvoir parallèlement à elle-même. Cette ligne, ou mieux son rapport à la longueur du rayon *a*O, est ce que les géomètres nomment le *sinus de l'angle d'incidence*. Une autre alidade, munie également d'un diaphragme percé d'un trou, reçoit, après son passage à travers l'eau, le rayon lumineux réfracté, et l'on mesure *ob* sur la règle : le rapport de *ob* au rayon O*b* égal à O*a* donne le *sinus de l'angle de réfraction*. Notons qu'en sortant de l'eau pour repasser dans l'air, le rayon lumineux n'a pas à subir de réfraction nouvelle, puisqu'il sort par une incidence normale à la surface du vase cylindrique.

Eh bien, supposons qu'une première observation ait donné deux sinus tels, qu'en divisant celui d'incidence par celui de réfraction, le quotient ou rapport soit le nombre 1,335. Répé-

1. On fait remonter jusqu'à l'astronome arabe Alhazen, qui vivait au douzième siècle de notre ère, la connaissance de cette loi.

tons l'expérience, une, deux, trois... fois, en changeant à chaque fois la direction du rayon incident. Dans chaque expérience nouvelle, le rapport du sinus d'incidence et du sinus de réfraction continuera à être 1,335. Et il en sera de même tant que les deux milieux seront toujours l'air et l'eau. Mais ce nombre, ce rapport, qu'on nomme *indice de réfraction*, varie



Fig. 73. — Descartes.

lorsque l'un des milieux change, ou quand les deux milieux changent à la fois : ainsi, de l'air au verre, l'indice de réfraction n'est plus égal à celui de l'air à l'eau. Aussi convient-on de calculer les indices de tous les corps transparents en supposant que la lumière passe du vide dans chacun d'eux. Alors on obtient les indices *absolus*[1]. Ordinairement la réfraction est

1. La considération des indices de réfraction est à chaque instant nécessaire dans les pro-

d'autant plus forte que la densité du deuxième milieu est elle-même plus considérable, bien qu'il y ait quelques exceptions[1]. Ainsi, le plus souvent, la réfringence du milieu croît avec sa densité.

La seconde loi de la réfraction de la lumière[2] peut donc s'énoncer ainsi :

blèmes de la dioptrique ; la construction des instruments où les prismes, les lentilles de diverses substances réfringentes sont employés, exige également que l'on connaisse cet élément avec précision. Enfin, en chimie et en minéralogie l'indice de réfraction est un caractère qui sert à distinguer les unes des autres certaines substances que leur aspect extérieur pourrait faire confondre. Aussi, depuis Descartes jusqu'à nos jours, les physiciens se sont-ils appliqués à imaginer ou à perfectionner les méthodes qui ont pour objet la mesure des indices de réfraction, soit pour les corps solides réfringents, soit pour les liquides, ou pour les gaz.

Nous ne pouvons entrer ici dans les détails que nécessiterait l'exposé de ces méthodes. Mais il peut être utile de connaître les résultats obtenus, au moins pour quelques-unes des substances les plus connues. Nous les résumons dans le tableau suivant :

INDICES DE RÉFRACTION.

Corps solides.		*Liquides.*	
Chromate de plomb	2,50 à 2,97	Sulfure de carbone à 0°	1,644
Diamant	2,60	— à 20°	1,624
Phosphore	2,22	Huile de lin	1,481
Soufre natif	2,115	— de naphte	1,475
Rubis	1,779	— d'olive	1,470
Cristal (flint-glass)	1,605	Alcool absolu à 10°	1,366
Émeraude	1,585	— à 25°	1,360
Sel gemme	1,550	Eau distillée à 0°	1,333
Glace de Saint-Gobain	1,543	— à 30°	1,331
Quartz	1,540	Humeur aqueuse	1,337
Sucre candi	1,535	— vitrée	1,339
Baume du Canada	1,530	*Gaz.*	
Verre (crown-glass)	1,529		
Alun	1,441 à 1,488	Air	1,000294
Borate de soude	1,475	Oxygène	1,000272
Cristallin de l'œil entier	1,384	Hydrogène	1,000138
Glace (eau solide)	1,310	Azote	1,000300

Nous devons faire observer que les indices de réfraction des solides et des liquides qui précèdent sont ceux qui correspondent à un faisceau de lumière homogène (celle de la raie D du spectre ou de l'alcool salé). On verra plus loin que la lumière blanche est formée de rayons qui se réfractent inégalement pour de mêmes milieux. Les indices de réfraction de ces milieux varient donc avec la nature des rayons de lumière qui s'y trouvent réfractés.

1. Par exemple, la densité de l'huile de térébenthine est 0,869, c'est-à-dire moindre que celle de l'eau, et cependant l'eau est moins réfringente que l'huile de térébenthine. L'indice de réfraction de l'alcool, de l'éther, des huiles fixes et volatiles surpasse beaucoup celui de l'eau ; cependant la densité de ces corps est moindre que celle de l'eau.

2. On a vu plus haut que l'énoncé de cette loi est dû à Descartes. Képler avait bien reconnu que pour de petits angles d'incidence (jusqu'à 30° environ) il y avait proportionnalité entre les angles d'incidence et de réfraction : ce qui est vrai approximativement, parce qu'alors les angles et les sinus varient à peu près de la même manière ; mais il savait aussi que, passé cette limite, cette approximation n'était plus vraie. Quant à Snellius, qui a découvert le premier la loi, il l'avait formulée par l'énoncé suivant : « *Le rapport des sécantes des compléments des angles d'incidence et de réfraction est constant,* » énoncé qui a été remplacé par celui que Descartes a proposé dans son *Traité de dioptrique.*

Pour deux milieux déterminés, le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est un nombre constant, quelle que soit d'ailleurs l'incidence.

Les lois que nous venons d'étudier indiquent quel chemin suit la lumière, quand le faisceau lumineux vient à passer d'un milieu dans un autre. Mais ce chemin, comme le prouvent à la fois le raisonnement et l'expérience, resterait le même si la lumière passait du second milieu dans le premier. Alors le rayon incident deviendrait le rayon réfracté, et réciproquement. Par exemple, si le point lumineux est dans l'eau en S (fig. 74), le rayon qui tombe au point I de la surface s'écartera de la perpendiculaire suivant la direction IR; la route SIR sera la même en sens inverse que si le rayon incident eût été RI, de sorte que les angles d'incidence et de réfraction auront des sinus inverses, mais dont le rapport sera toujours constant. Cela revient à dire que l'indice de réfraction d'un milieu pour un autre milieu est l'inverse de l'indice du second pour le premier.

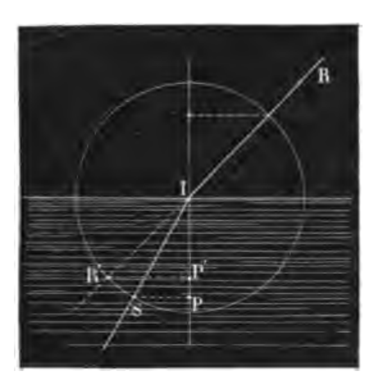


Fig. 74. Loi du sinus.

On dit encore d'une manière générale : la lumière qui traverse un système de milieux transparents suit toujours le même chemin, soit qu'elle se propage dans un sens, soit qu'elle marche en sens opposé.

Ces lois permettent de rendre compte des phénomènes que nous avons décrits au début de ce chapitre. L'œil qui examine l'extrémité d'un bâton plongé dans l'eau voit cette extrémité par le faisceau lumineux qu'elle envoie à la surface, faisceau qui se réfracte, et dont les divers rayons, d'autant plus déviés que leur incidence est plus oblique, pénètrent dans l'œil en divergeant. Le phénomène est donc le même que si le point lumineux était au point de convergence de ces rayons (fig. 75),

et l'œil voit en effet l'extrémité du bâton en ce point. Le même effet se produit pour tous les points intermédiaires, et le bâton paraît brisé.

La même explication rend compte de l'élévation du fond d'un vase plein de liquide, ou de celle du fond d'un ruisseau, d'une rivière, dont l'eau est limpide. La profondeur réelle est toujours plus grande que la profondeur apparente, et pour l'évaluer on doit tenir compte de l'illusion qui résulte de la réfraction. Lors même qu'on regarde le fond dans une direction perpendiculaire, cette illusion se produit, parce que l'œil ne reçoit

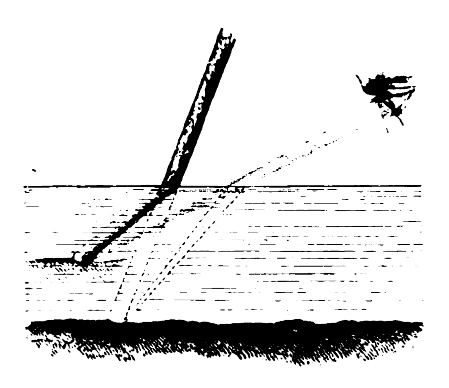


Fig. 75. — Explication du bâton brisé.



Fig. 76. — Élévation apparente du fond d'une rivière, d'un vase. Explication.

pas un rayon unique, mais un faisceau dont les rayons divergent plus, en passant dans l'air, à cause de la réfraction,

que dans le liquide. Le point paraît donc remonté vers la surface, de O en O′ (fig. 76), et il en est ainsi pour tous les points du fond, soit du vase, soit de la rivière observée.

§ 3. PHÉNOMÈNES DE RÉFLEXION TOTALE.

Il résulte des lois de la réfraction un phénomène singulier, dont la théorie rend compte et que l'expérience vérifie, et qui a reçu le nom de *réflexion totale*. Voici en quoi consiste ce phénomène :

Considérons, par exemple, un point lumineux placé dans l'eau, au fond d'un vase. Ce point envoie des rayons de lumière dans toutes les directions possibles à la surface de séparation de l'air et de l'eau. Or tous ces rayons émergent-ils? On va

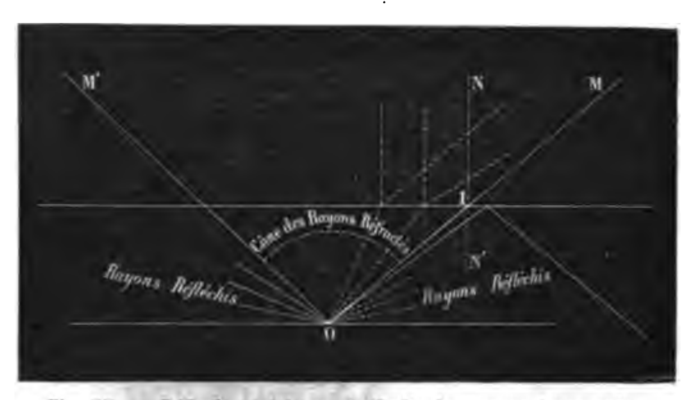


Fig. 77. — Réflexion totale, angle limite des rayons émergents.

voir que cela ne peut être, et qu'il y a un certain angle, variable avec la nature du milieu, au delà duquel le rayon lumineux ne peut pénétrer dans le milieu le moins réfringent. En effet, le rayon lumineux passe ici de l'eau dans l'air, d'un milieu plus réfringent dans un milieu qui l'est moins ; il s'écarte donc de la normale, et l'angle de réfraction est plus grand que l'angle d'incidence. A mesure que ce dernier angle ira en croissant, l'angle de réfraction à la sortie de l'eau croîtra lui-même, et par conséquent il arrivera un moment où, le premier angle étant devenu droit, l'angle d'incidence OIN′ ne le sera pas encore.

A partir de ce point, de cet angle limite, le rayon n'émergera plus; il rasera la surface horizontale du liquide. Au delà, l'angle d'incidence croissant toujours, l'angle de réfraction devrait être plus grand qu'un angle droit. Dans ce cas, le rayon retourne au sein du liquide, et il se réfléchit, d'après les lois



Fig. 78. — Phénomène de réflexion totale.

connues de la réflexion, à la surface interne de séparation. Comme, dans les incidences moindres, l'émergence n'est pas complète et qu'il y a une réflexion partielle des rayons, on dit, lorsque cette émergence est nulle, qu'il y a *réflexion totale*. Tous les rayons lumineux qui, de O, vont couper la surface de séparation des deux milieux se divisent ainsi en deux parties;

la première, contenant ceux qui émergent, forme le *cône des rayons réfractés*, la seconde se compose de tous les rayons qui ne peuvent émerger et sont réfléchis à l'intérieur du milieu le plus réfringent.

On nomme *angle limite* celui au delà duquel commence la réflexion totale : sa valeur dépend de l'indice de réfraction du milieu. Ainsi, l'angle limite, qui est de 48 degrés et demi environ pour les rayons qui se réfractent de l'eau dans l'air, est seulement de 41 degrés du verre dans l'air.

Une expérience fort simple permet de constater le phénomène de la réflexion totale, et fait voir en même temps que la réflexion ainsi obtenue surpasse en éclat toutes celles qu'on obtiendrait directement, par exemple, à la surface du mercure ou des métaux polis. On remplit d'eau un verre à boire que l'on tient de façon que la surface du liquide soit au-dessus de l'œil (fig. 78). En regardant obliquement la partie inférieure de cette surface, elle paraît plus brillante que l'argent poli et semble avoir un éclat métallique. La partie inférieure d'un objet qui plonge dans l'eau se voit réfléchie comme par un miroir.

Un plongeur, immergé dans une eau parfaitement tranquille, et portant les yeux vers la surface du liquide, sera témoin de phénomènes singuliers. La réfraction lui fera voir, dans un cercle d'environ 97 degrés de diamètre, tous les objets situés au-dessus de l'horizon d'autant plus déformés et rétrécis, surtout dans le sens de la hauteur, qu'ils seront plus voisins de l'horizon sensible. « Au delà de cette limite, le fond de l'eau et les objets submergés seront réfléchis et se peindront à la vue aussi vivement que par la vision directe. De plus, l'espace circulaire dont nous venons de parler paraîtra entouré d'un arc-en-ciel perpétuel, coloré faiblement, mais avec beaucoup de délicatesse. » (J. Herschel.)

C'est aussi le phénomène de la réflexion totale qui explique comment il se fait qu'un prisme de verre isoscèle et rectangle, adapté à l'ouverture du volet d'une chambre obscure, intercepte toute lumière venue du dehors et laisse la chambre dans

la plus complète obscurité. Les rayons qui pénètrent dans le prisme par sa face perpendiculaire (fig. 79) y pénètrent sans réfraction, mais, arrivés à la surface oblique, l'angle d'incidence est de 45 degrés, c'est-à-dire supérieur à l'angle limite : la réflexion totale a lieu, et il n'y a pas d'émergence. Les rayons qui peuvent entrer seraient dus à des incidences obliques, que le tube opaque où est logé le prisme intercepte.

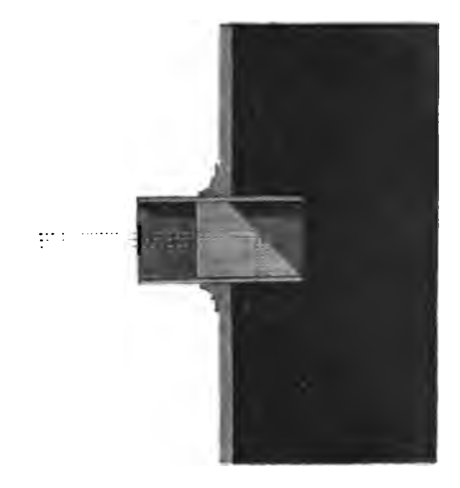


Fig. 79. — Phénomène de réflexion totale dans un prisme rectangle isoscèle.

La figure 80 montre un effet curieux d'illumination d'une gerbe liquide, dû à la réflexion totale. On emplit d'eau un vase cylindrique percé à sa partie inférieure d'un orifice par où le liquide s'écoule sous la forme d'un jet de forme parabolique. A l'opposé de l'orifice d'écoulement, par une ouverture que ferme une glace, on projette un faisceau de lumière intense concentré à l'aide d'une lentille. Le faisceau tombe à l'intérieur de la gerbe liquide sous une incidence oblique qui dépasse l'angle limite. Il se réfléchit totalement une première fois; puis, à cause de la



Fig. 80. — Fontaine lumineuse. Phénomène de réflexion totale.

courbure du jet, une seconde, une troisième fois, indéfiniment. La gerbe est vivement éclairée et semble ainsi une gerbe de feu. L'interposition de glaces diversement colorées permet de varier à volonté l'aspect de cette sorte de *fontaine lumineuse*, qu'on emploie sur le théâtre dans les pièces de féerie.

§ 4. LA RÉFRACTION DANS L'ATMOSPHÈRE.

Le phénomène de la réfraction a lieu toutes les fois qu'un rayon de lumière passe d'un milieu dans un autre, quand celui-ci par sa nature et sa densité diffère du premier. Il est donc évident que les rayons lumineux émanés des astres, du Soleil, des Étoiles, de la Lune, et qui, après avoir cheminé dans les espaces célestes, ont à traverser les couches de l'atmosphère pour arriver jusqu'à notre œil, subissent une réfraction. Dès lors, nous ne voyons pas les astres dans la direction des lignes droites qui joignent réellement chacun d'eux à la position que nous occupons à la surface de la Terre. Il n'y a d'exception que pour ceux qui se trouvent au zénith de chaque horizon.

La réfraction atmosphérique dépend de la hauteur angulaire à laquelle l'astre observé se trouve au-dessus de l'horizon ; elle dépend pareillement de la loi suivant laquelle décroissent les densités des couches d'air dont se compose l'atmosphère. Comme on n'a que des données fort incertaines sur cette loi, il eût été très difficile de mesurer directement les déviations qui correspondent aux diverses hauteurs des astres. Heureusement l'astronomie est venue au secours de la physique. La distance angulaire d'une étoile au pôle céleste restant invariable, quelle que soit la hauteur à laquelle le mouvement diurne l'amène au-dessus de l'horizon, les différences que l'observation constate entre les distances obtenues depuis la plus grande hauteur jusqu'à l'horizon même, ne peuvent provenir que de la réfraction atmosphérique. De là la possibilité de construire une

table de réfractions atmosphériques, de l'horizon jusqu'au zénith, table fort utile pour corriger la position apparente d'un astre de l'augmentation de hauteur due à la réfraction, et obtenir ainsi sa position réelle.

A l'horizon la réfraction s'élève à près de 34'. Comme le diamètre du Soleil et celui de la Lune ont une valeur moindre, il en résulte qu'en mer, où aucun objet ne masque la limite de l'horizon, le disque du Soleil apparaît déjà tout entier au-dessus de la nappe liquide avant que le sommet de l'astre ait émergé au-dessus de cette limite : on voit l'astre avant son lever réel. La journée se trouve ainsi allongée le matin par la réfraction, et on comprend qu'il en est de même le soir, au coucher du Soleil.

Le même phénomène rend compte de cette particularité curieuse observée dans plusieurs éclipses de Lune, que ce dernier astre était vu éclipsé alors que le Soleil était encore visible à l'horizon occidental. Enfin, c'est aussi la réfraction atmosphérique qui, dans les éclipses totales de Lune, permettant à une certaine quantité de rayons solaires d'atteindre notre satellite, empêche que son disque soit complètement invisible. Ce disque présente alors généralement une coloration rougeâtre très marquée, semblable à celle dont l'atmosphère est teinte au moment du coucher du Soleil.

Nous ne faisons que donner ici quelques indications sommaires sur un phénomène dont l'étude a pour l'astronomie d'observation la plus haute importance. Mais nous les compléterons plus tard dans la partie de ce volume qui sera consacrée à l'optique météorologique.

CHAPITRE VI

RÉFRACTION DANS LES PRISMES ET LES LENTILLES

§ 1. RÉFRACTION DANS LES LAMES TRANSPARENTES A FACES PARALLÈLES.

Les lois de la réfraction, telles qu'on les a vues formulées dans le chapitre précédent, permettent de résoudre toutes les questions qui ont pour objet la marche des rayons ou des faisceaux lumineux, lorsqu'ils ont à traverser des milieux d'inégale réfringence. Il suffit de connaître les indices de réfraction de ces différents milieux, ainsi que la forme des surfaces de séparation. Ces données étant connues, les questions à résoudre sont du pur domaine de la géométrie et de l'analyse.

Nous ne ferons ici, comme on le pense bien, qu'effleurer de telles questions, en ne nous attachant qu'aux solutions les plus simples, et c'est le plus souvent à l'expérience que nous en demanderons la vérification. Cela nous suffira pour l'intelligence des applications de l'optique, soit aux instruments les plus usités, soit à l'explication des phénomènes naturels qui dépendent de la réfraction.

Voyons d'abord ce qui se passe quand un rayon de lumière pénètre à l'intérieur de lames réfringentes terminées par des surfaces planes et parallèles. Quand on examine un point lumineux à travers une lame de substance transparente, de verre je suppose, dont les deux faces planes sont parallèles, si l'œil et le point sont sur une même perpendiculaire à la lame, le point lumineux est vu dans la direction même où il serait aperçu

sans aucune interposition de milieu réfringent. Cela tient à ce qu'il n'y a pas de réfraction pour les rayons normaux.

Mais il n'en est pas de même pour une incidence oblique. En ce cas, le point lumineux est dévié. Cette déviation est rendue sensible par une expérience d'une grande simplicité. Prenez une lame de verre, posez-la sur un papier où se trouvent tracées des lignes droites et courbes, de manière que la lame ne recouvre qu'une partie des lignes. En regardant perpendiculairement, vous trouverez que les lignes vues par transparence sont la continuation des lignes vues directement. En regardant obliquement, vous remarquerez une déviation, une solution de continuité d'autant plus marquée que l'incidence des rayons

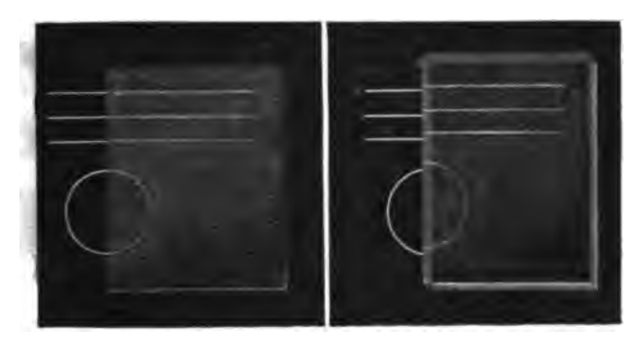


Fig. 81. — Déviation due à la réfraction à travers des lames à faces parallèles.

lumineux sera plus oblique. Cette déviation est due à la réfraction, et elle est aussi d'autant plus forte que l'épaisseur de la lame est plus considérable.

Il résulte évidemment de là que les lames transparentes, les vitres, les glaces dont on recouvre les gravures pour les encadrer déforment les images, puisque les rayons qui viennent à l'œil des divers points du tableau ont traversé sous des incidences très diverses l'épaisseur de la glace : les uns normalement, les autres obliquement. La déviation, nulle pour les premiers points, ne l'est pas pour les derniers. Si la glace transparente avait une grande épaisseur, la déformation serait apparente, mais elle est pour ainsi dire insensible avec les épaisseurs usitées.

Du reste, quand nous parlons de déviation, c'est déplacement latéral qu'il serait préférable de dire, car le rayon lumineux qui traverse une ou plusieurs lames à faces parallèles conserve, après son émergence, une direction parallèle à celle du rayon incident, comme le montre d'une manière assez évidente la figure 82. Cette propriété est une conséquence du parallélisme des normales aux points d'incidence et d'émergence, ainsi que des lois de la réfraction, pour deux milieux dont la réfringence est donnée. L'expérience montre que les rayons sont toujours parallèles s'ils sortent après avoir traversé un nombre quelconque de lames, alors même que ces lames ne

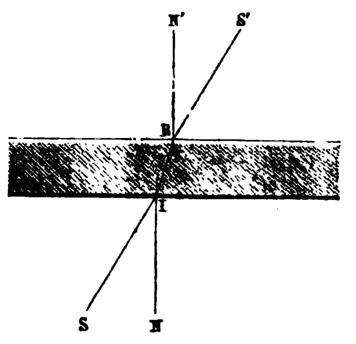


Fig. 82. — Marche d'un rayon lumineux à travers une lame à faces parallèles.



Fig. 83. Marche d'un faisceau lumineux.

seraient pas formées de substances identiques, et qu'elles ne seraient point situées parallèlement; et la théorie permettait de prévoir ce résultat. Enfin, il est encore le même quand les lames de substances différentes sont contiguës. Le déplacement latéral dépend, dans tous les cas, de la réfringence des substances et de l'épaisseur des lames.

Si l'on met une bougie en face d'un miroir étamé, et qu'on se place obliquement pour en examiner l'image, on apercevra, en avant de l'image brillante formée sur la face intérieure étamée, une image plus faible provenant de la face extérieure du verre et, en outre, une série d'images encore moins brillantes situées en arrière de la première. Ces dernières images sont dues aux rayons qui, après s'être réfractés une première

fois dans l'épaisseur de la lame, se trouvent partiellement réfléchis par la face étamée et par la face intérieure de la surface externe du miroir. La figure 85, qui donne la marche successive de ces rayons, rend compte du phénomène, aisé à constater, que nous venons de décrire. S′ est l'image du point S formée par la réflexion directe de la surface antérieure non étamée. S″ est l'image la plus brillante qui provient de la réflexion sur la face étamée : le faisceau qui la forme a été



Fig. 84 — Images multiples produites par la réfraction dans les lames à faces parallèles.

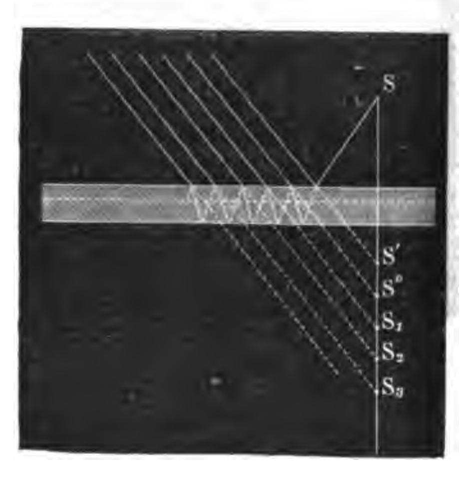


Fig. 85. — Marche des rayons qui donnent lieu aux images multiples des lames à faces parallèles.

réfracté à son entrée dans le verre, s'est réfléchi tout entier, puis est ressorti après une seconde réfraction. Mais à cette sortie une partie des rayons de retour a seule émergé ; les autres se sont réfléchis sur la face interne de la surface extérieure de la glace, et ainsi de suite. De là les images successives, très affaiblies d'ailleurs, du point lumineux. Elles sont d'autant plus distinctes qu'on les observe plus obliquement. On n'en verrait qu'une, si l'on se plaçait normalement en face du point.

... sur laquelle on atteint ... il n'y a plus d'émergence ... compose le prisme ... 45 degrés, tout ... normale du côté ... limite est de 41° ... de la base.



... les objets vus à travers les prismes.

... dont l'angle dépasserait le double ... pour le verre), dont la base serait noircie ... transversalement à l'ouverture d'une chambre ... fermer, ne laisserait pénétrer à l'intérieur ... lumière.

... loin les phénomènes de coloration ... faisceaux lumineux déviés par ... la marche de la lumière ...

elle traverse des milieux réfringents terminés par des surfaces courbes.

§ 3. RÉFRACTION DANS LES LENTILLES.

Si l'on taille dans un morceau de verre, ou dans une autre substance réfringente, un disque dont les deux faces soient bombées et aient la forme rigoureuse de deux portions de sphère, on a ce que l'on nomme une *lentille*. Le nom est tiré, comme on le voit, de la ressemblance qui existe entre la forme d'une telle masse avec celle du légume connu de tout le monde. Il y a, nous allons bientôt le voir, diverses sortes de lentilles ; mais c'est celle que nous venons de décrire qui forme l'instrument appelé *loupe*, employé dans une foule d'usages par toutes les personnes, naturalistes, graveurs, horlogers, etc., qui ont besoin de grossir, pour les voir avec plus de détails, les parties les plus petites des objets.

Il paraît certain que les lentilles de verre et leurs effets grossissants sont connus depuis fort longtemps. On a trouvé des objets analogues, et dont l'emploi optique ne semble pas douteux, dans les fouilles de Ninive et dans celles de Pompéi et d'Herculanum. Les besicles sont en usage, en Europe, au moins depuis le commencement du quatorzième siècle. Mais ce n'est guère que depuis trois cents ans que la connaissance des lois rigoureuses de la réfraction a permis aux opticiens de construire et de combiner des verres de façon à obtenir avec précision tel ou tel effet voulu.

Les physiciens ont donné par extension le nom de lentilles à toutes les masses transparentes terminées au moins d'un côté par des surfaces courbes, sphériques, cylindriques, etc., alors même que ces surfaces sont concaves au lieu d'être convexes comme dans la loupe. Le plus souvent, et à moins qu'on ne dise expressément le contraire, les surfaces des lentilles sont toutes deux sphériques ; ou bien, l'une étant plane, l'autre est sphérique. C'est ce que nous supposerons toujours dans le

CHAPITRE VI

RÉFRACTION DANS LES PRISMES ET LES LENTILLES

§ 1. RÉFRACTION DANS LES LAMES TRANSPARENTES A FACES PARALLÈLES.

Les lois de la réfraction, telles qu'on les a vues formulées dans le chapitre précédent, permettent de résoudre toutes les questions qui ont pour objet la marche des rayons ou des faisceaux lumineux, lorsqu'ils ont à traverser des milieux d'inégale réfringence. Il suffit de connaître les indices de réfraction de ces différents milieux, ainsi que la forme des surfaces de séparation. Ces données étant connues, les questions à résoudre sont du pur domaine de la géométrie et de l'analyse.

Nous ne ferons ici, comme on le pense bien, qu'effleurer de telles questions, en ne nous attachant qu'aux solutions les plus simples, et c'est le plus souvent à l'expérience que nous en demanderons la vérification. Cela nous suffira pour l'intelligence des applications de l'optique, soit aux instruments les plus usités, soit à l'explication des phénomènes naturels qui dépendent de la réfraction.

Voyons d'abord ce qui se passe quand un rayon de lumière pénètre à l'intérieur de lames réfringentes terminées par des surfaces planes et parallèles. Quand on examine un point lumineux à travers une lame de substance transparente, de verre je suppose, dont les deux faces planes sont parallèles, si l'œil et le point sont sur une même perpendiculaire à la lame, le point lumineux est vu dans la direction même où il serait aperçu

sans aucune interposition de milieu réfringent. Cela tient à ce qu'il n'y a pas de réfraction pour les rayons normaux.

Mais il n'en est pas de même pour une incidence oblique. En ce cas, le point lumineux est dévié. Cette déviation est rendue sensible par une expérience d'une grande simplicité. Prenez une lame de verre, posez-la sur un papier où se trouvent tracées des lignes droites et courbes, de manière que la lame ne recouvre qu'une partie des lignes. En regardant perpendiculairement, vous trouverez que les lignes vues par transparence sont la continuation des lignes vues directement. En regardant obliquement, vous remarquerez une déviation, une solution de continuité d'autant plus marquée que l'incidence des rayons

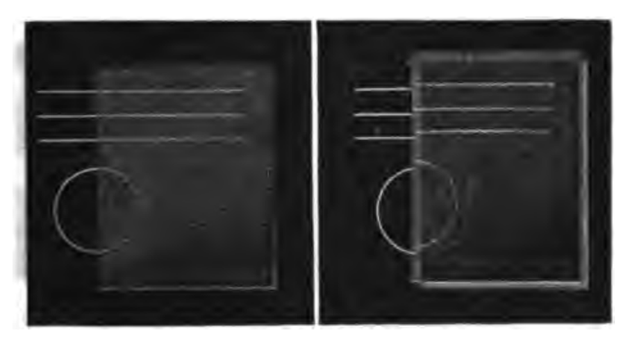


Fig. 81. — Déviation due à la réfraction à travers des lames à faces parallèles.

lumineux sera plus oblique. Cette déviation est due à la réfraction, et elle est aussi d'autant plus forte que l'épaisseur de la lame est plus considérable.

Il résulte évidemment de là que les lames transparentes, les vitres, les glaces dont on recouvre les gravures pour les encadrer déforment les images, puisque les rayons qui viennent à l'œil des divers points du tableau ont traversé sous des incidences très diverses l'épaisseur de la glace : les uns normalement, les autres obliquement. La déviation, nulle pour les premiers points, ne l'est pas pour les derniers. Si la glace transparente avait une grande épaisseur, la déformation serait apparente, mais elle est pour ainsi dire insensible avec les épaisseurs usitées.

Avant toute expérience, les lois connues de la réfraction nous montrent qu'un rayon de lumière qui se propage dans la direction de l'axe traversera la lentille sans déviation et continuera sa route suivant cet axe même, absolument comme s'il traversait normalement une lame à faces parallèles.

Il y a d'autres lignes qui jouissent d'une propriété analogue et qu'on nomme pour cela des *axes secondaires*. Ce sont celles qui, dans les lentilles biconcaves ou biconvexes dont les faces ont le même rayon de courbure, coupent l'axe au milieu de l'épaisseur maximum ou minimum : IOI' (fig. 94) est un axe secondaire dans chacune des lentilles représentées. Toutes les fois qu'un rayon lumineux NI suit, après son entrée, la direction d'une de ces lignes, il émerge dans une direction N'I' parallèle à celle du rayon incident, et comme les épaisseurs des lentilles sont ordinairement très petites, on peut dire que le rayon incident et le rayon émergé cheminent sans déviation dans la direction même de l'axe secondaire. On nomme *centre optique* de la lentille le point O où concourent l'axe principal et les axes secondaires. Si les deux faces n'ont pas la même courbure, le *centre optique* est toujours à l'intérieur, mais il n'est plus à égale distance des deux faces. Pour les lentilles *plan-convexes* et *plan-concaves*, le centre optique est sur la surface courbe ; dans les ménisques convergents et divergents, il est à l'extérieur de la lentille ; mais tandis qu'il se trouve du côté de la face convexe dans le ménisque convergent, c'est du côté de la face concave qu'est placé le centre optique d'un ménisque divergent.

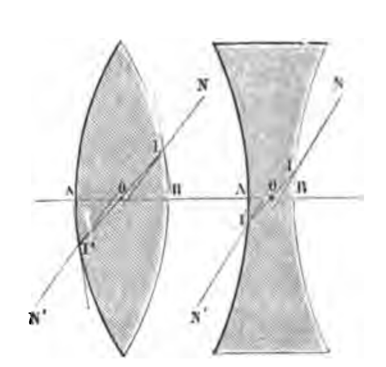


Fig. 94. — Axes secondaires des lentilles. Centre optique.

Ces définitions bien comprises, voyons quelle est la marche de la lumière à travers une lentille biconvexe.

Plaçons-la en face du Soleil, de manière que son axe prin-

cipal soit parallèle aux rayons de cet astre. Puis recevons la lumière qui émerge de la lentille, sur un écran placé de l'autre côté et à une certaine distance. Nous apercevrons sur l'écran un cercle lumineux, dont la netteté et les dimensions dépendront de la distance où l'écran est de la lentille. En éloignant ou en rapprochant l'écran, nous finirons par trouver une position telle, que cet éclat sera le plus vif possible, la netteté de l'image circulaire la plus grande et ses dimensions les plus petites : ce serait un point mathématique, si la source de lumière était elle-même un point. Ce point où viennent converger[1], après leur réfraction, les rayons parallèles à l'axe principal se nomme le *foyer principal* de la lentille. La distance FA du foyer à la lentille, qu'on nomme la *distance focale principale*, dépend à la fois de la substance qui la compose (c'est-à-dire de l'indice de réfraction de cette substance) et de la courbure de ses surfaces. Plus la courbure est prononcée, moins la distance focale est considérable, ce qu'on exprime en disant que la lentille a un court foyer.

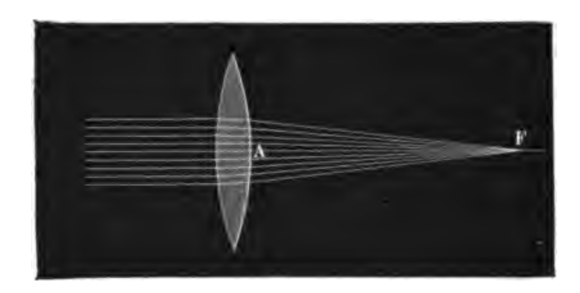


Fig. 95. — Marche des rayons parallèles à l'axe. Foyer principal.

Si la lentille est placée à l'ouverture de la chambre obscure, on peut suivre dans l'air la marche convergente des rayons, le cône lumineux s'accuse alors par l'illumination de la fumée ou des poussières qui voltigent dans la chambre.

La convergence des rayons lumineux produite par les len-

1. Cette convergence des rayons lumineux en un même point n'est rigoureuse que si l'on suppose la lentille infiniment mince, et son ouverture infiniment petite. Dans la pratique, elle n'existe pas, et le défaut de concours des rayons est ce qu'on nomme l'*aberration de sphéricité*. Les rayons qui se croisent ainsi au lieu de concourir en un point unique, forment des courbes qu'on nomme des *caustiques*. Ces *caustiques par réfraction* sont analogues aux caustiques des miroirs sphériques, ou *caustiques par réflexion*.

tilles biconvexes s'explique aisément par la marche de la lumière réfractée à travers un prisme. On sait que l'effet produit par ce dernier milieu est de ramener le rayon lumineux vers la base du prisme. Or une lentille biconvexe peut être considérée comme formée par une série de prismes superposés et dont l'angle est d'autant plus aigu qu'ils s'approchent plus de l'axe principal, la déviation étant d'autant plus forte que l'angle est plus ouvert. La figure 96 suffit pour rendre compte de la convergence des rayons, et l'expérience est d'accord avec la théorie pour montrer que le point de concours est sur l'axe principal, pourvu que les rayons soient très voisins de l'axe.

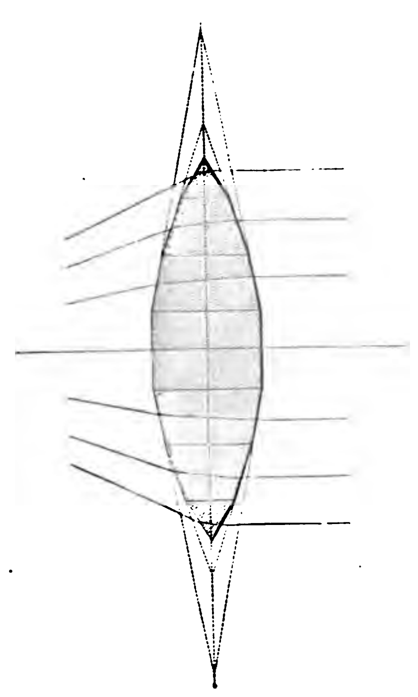


Fig. 96. — La lentille considérée comme un assemblage de prismes.

Examinons les circonstances diverses qui se produisent quand le point lumineux S s'approche de plus en plus de la lentille, sur l'axe principal. L'explication est du reste la même quand les rayons lumineux, au lieu de partir d'un point situé à une distance infinie, proviennent d'une lumière située sur l'axe à une distance finie. Seulement, dans ce cas, le foyer ne coïncide plus avec le foyer principal. Tant que ce point est, d'un côté de la lentille, au delà de la distance focale, son foyer S' se forme sur l'axe au delà du foyer principal; et plus il se rapproche, plus ce foyer s'éloigne. Arrive-t-il à n'être plus éloigné de la lentille que du double de la distance focale, le foyer correspondant est précisément à la même distance. S'il se rapproche encore de la lentille, le foyer continue à s'éloigner rapidement, jusqu'à ce que, le

point lumineux atteignant la distance focale même, son foyer disparaisse, ou, ce qui revient au même, s'éloigne à l'infini.

Jusque-là la convergence des rayons lumineux s'effectue réellement après leur sortie de la lentille ; le foyer est *réel* ; ce dont il est facile de s'assurer en recevant le cône lumineux sur un écran où les rayons concentrés produiront une image de l'objet, un point lumineux si cet objet est lui-même un point lumineux. De plus les deux points de l'axe où se trouvent l'objet d'une part, et le foyer de l'autre, sont réciproques l'un de l'autre, c'est-à-dire que si le foyer S' devient le point lumineux, c'est la position première S du point lumineux qui marque le nouveau foyer (fig. 97). Voilà pourquoi les physi-

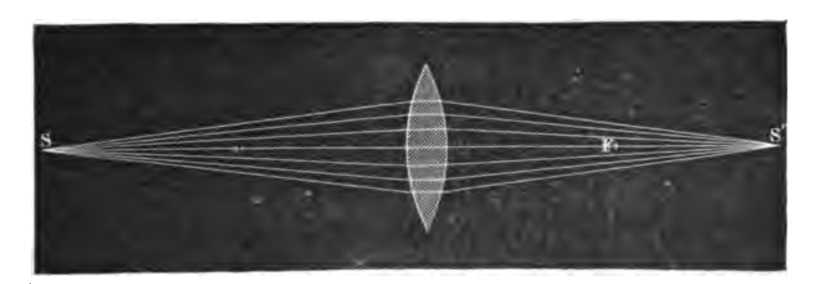


Fig. 97. — Marche des rayons émanés d'un point lumineux sur l'axe. Foyers conjugués.

ciens donnent à ces points, que le calcul permet de trouver aisément quand on connaît la distance focale principale, le nom de *foyers conjugués*. Nous avons constaté le même fait dans les miroirs.

Poursuivons notre étude.

Le point lumineux S part du foyer principal et s'approche vers la lentille ; sa distance est moindre que la distance focale (fig. 98). Alors les rayons lumineux, après leur émergence, s'éloignent de l'axe ou divergent, de sorte qu'il n'y a plus de foyer réel ; mais le faisceau divergent prolongé du même côté que l'objet converge encore sur l'axe, où il va former un foyer virtuel S'. Il n'est plus possible alors de recueillir ce faisceau sur un écran ; mais l'œil reçoit les rayons lumineux comme s'ils émanaient de ce foyer, et l'impression qu'il en éprouve est celle

d'une image du point lumineux formé en S'. Plus l'objet s'approche de la lentille, plus l'image s'en approche elle-même; et quand l'objet arrive en contact avec la surface transparente, l'image y arrive en même temps que lui.

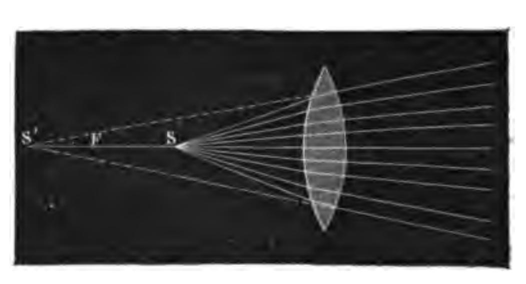


Fig. 98. — Marche des rayons émanés d'un point situé entre le foyer principal et la lentille. Foyer virtuel.

La marche des rayons lumineux dans une lentille plan-convexe, ou dans un ménisque convergent est la même que dans la lentille biconvexe; seulement la distance focale varie avec la forme, le degré de courbure, l'épaisseur.

§ 4. IMAGES FORMÉES PAR LES LENTILLES.

Tous ces résultats se démontrent par le calcul, mais l'expérience peut les rendre sensibles. C'est ce que nous allons faire avec elle, en examinant les images tant réelles que virtuelles qui se forment aux foyers d'une lentille biconvexe ou, en général, d'une lentille convergente, lorsqu'on la met en face d'un objet lumineux.

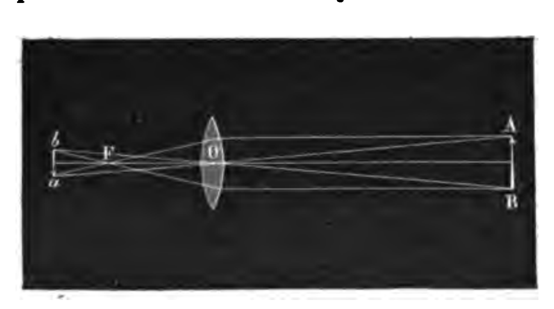


Fig. 99. — Image réelle, renversée et plus petite que l'objet.

Nous avons déjà vu comment se forme l'image d'un objet dont la distance peut être considérée comme infinie, et qui envoie à la lentille un faisceau de rayons parallèles : c'est ainsi que le Soleil donne une image au foyer principal de la lentille. Si l'objet AB est à une distance finie, mais supérieure au double de la distance focale principale, l'image *ab*

se formera au delà du foyer; elle sera réelle, renversée et plus petite que l'objet. Prenons une bougie pour faire l'expérience, et recevons l'image sur un écran que nous rapprocherons ou



Fig. 100. — Image réelle, renversée et plus grande que l'objet.

éloignerons de la lentille, jusqu'à ce qu'il y ait netteté parfaite de l'image : nous constaterons aisément le résultat. Plus la distance de la bougie va diminuer, plus nous verrons l'image, toujours réelle, s'éloigner et grandir, jusqu'à ce qu'elle devienne précisément égale à l'objet lui-même. A cet instant, si l'on mesure les distances qui séparent la lentille de l'écran et de la bougie, on les trouve égales entre elles, et chacune est double de la distance focale principale. La bougie continuant d'approcher de la lentille, l'image réelle grandit et s'éloigne; elle est donc de dimensions plus grandes que celles de l'objet (voy. fig. 100 et 101). Il faut éloigner de plus en plus l'écran pour

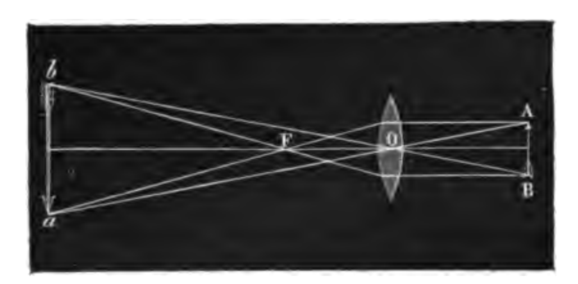


Fig. 101. — Image d'un objet situé à une distance de la lentille plus grande que la distance focale principale, et moindre que le double de cette distance.

la recevoir nette, mais on remarque alors dans son éclat une diminution qui s'explique par l'éparpillement des rayons lumineux émergés de la lentille, sur une surface qui croît plus vite que la quantité de lumière reçue.

La bougie, une fois arrivée à la distance focale, l'image disparaît, et cela est aisé à concevoir, puisque alors, les rayons sortant parallèlement à l'axe, il n'y a plus de convergence. Jusqu'ici l'image a toujours été réelle : en d'autres termes, il a toujours été possible de la recevoir sur un écran; elle a une existence indépendante de l'observateur. Il n'en sera plus de même si nous continuons à approcher la bougie ou tout autre objet de la lentille : l'écran placé à une distance quelconque ne recevra et ne renverra plus que de la lumière diffuse. Cependant, au lieu et place de l'écran, plaçons notre œil même. Nous verrons au travers de la lentille une image de la bougie, image qui n'est plus renversée, mais droite et grossie. Comment se fait-il que l'œil reçoive la sensation d'une image qui n'a rien alors de réel? Cela est facile à comprendre : les faisceaux lumineux qu'envoie alors à la lentille chacun des points de l'objet, sortent en divergeant du milieu réfringent; l'œil qui les reçoit éprouve la même sensation que s'il s'agissait de rayons émanés directement de points lumineux situés de l'autre côté de la lentille, mais à une plus grande distance que l'objet même auquel ils appartiennent. De là l'agrandissement des dimensions apparentes; de là aussi le sens de l'image qui, devenant virtuelle, cesse d'être renversée (fig. 102). Dans ce cas, à mesure que l'objet se rapproche de la lentille, l'image diminue jusqu'au moment où, venant à toucher l'une de ses faces, l'image est devenue sensiblement égale à l'objet même.

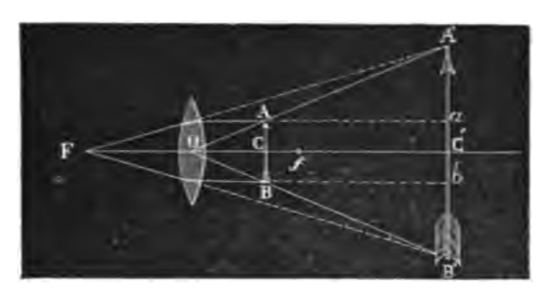


Fig. 102. — Image droite et virtuelle d'un objet situé entre le foyer principal et la lentille.

Voilà pour les images que produisent les lentilles convergentes.

Les lentilles divergentes n'ont pas de foyer réel. Par exemple, si l'on considère un faisceau de rayons parallèles à l'axe — c'est le cas où le point lumineux est situé sur l'axe à une distance infinie — en sortant de la lentille, les rayons divergent; leur point de concours F est situé sur l'axe en avant de la lentille : c'est ce qu'on nomme le foyer principal, foyer qui n'est plus réel, mais virtuel. L'œil, qui reçoit le faisceau divergent au sortir de la lentille, éprouve la même sensation que s'il existait réellement un point lumineux au foyer.

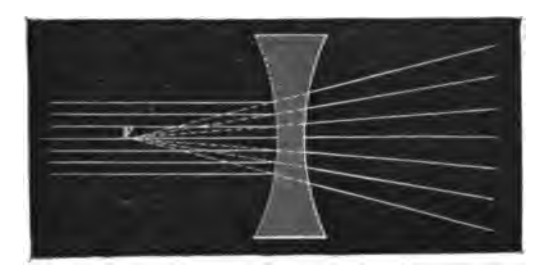


Fig. 103. — Foyer principal virtuel des lentilles divergentes.

Avec les lentilles divergentes, il n'y a jamais non plus d'image réelle, par la raison que les rayons lumineux, au sortir du milieu réfringent, s'éloignant les uns des autres, n'ont pas de point effectif de réunion. Mais en leur appliquant ce qu'on vient de dire du cas où l'image donnée par une lentille convergente est droite et virtuelle, on comprend que les images des lentilles divergentes sont pareillement virtuelles et droites. Seulement, il y a cette différence, que leurs dimensions apparentes sont toujours moindres que celles des objets qu'elles représentent. La figure 104 montre la raison de ce dernier fait, et permet de comprendre pourquoi les images, d'autant plus

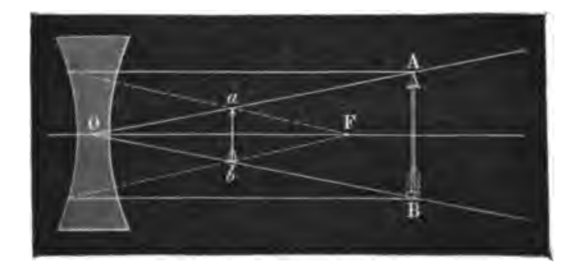


Fig. 104. — Image droite virtuelle et plus petite que l'objet dans une lentille biconvave.

petites que l'objet est plus éloigné, finissent par atteindre en grandeur l'objet même, quand ce dernier arrive à toucher la lentille.

L'usage des lentilles convergentes ou divergentes dans les expériences de physique, ou leur emploi dans les instruments d'optique, exige qu'on connaisse leur foyer ou leur distance focale principale. Il y a des formules qui permettent de calculer cette distance, quand on connaît l'indice de réfraction de la substance qui compose la lentille, ainsi que les rayons de courbure des surfaces qui la terminent. Mais on peut déterminer aussi par des expériences assez simples, sinon fort exactes, cette distance focale.

Voici comment on procède lorsqu'il s'agit d'une lentille convergente. On reçoit les rayons du Soleil parallèlement à l'axe; puis, avec un écran qu'on approche ou qu'on éloigne, on cherche la position pour laquelle l'image circulaire qui s'y projette est la plus petite possible. Quand cette position est atteinte, l'écran se trouve précisément au foyer principal. On peut encore procéder autrement. On projette sur un écran l'image réelle d'un objet formée à l'aide de la lentille, et l'on déplace soit l'écran, soit l'objet, jusqu'à ce que leurs dimensions soient égales. Nous avons vu que, dans ce cas, l'un et l'autre sont à la même distance de la lentille, et cette distance est le double de la distance focale principale. On aura donc cette dernière en mesurant l'intervalle compris entre l'objet et son image et en en prenant le quart.

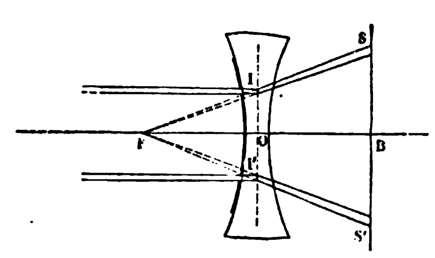


Fig. 105. — Détermination expérimentale de la distance focale d'une lentille divergente.

S'il s'agit d'une lentille divergente, on recouvre sa surface d'un morceau de papier noir ou de noir de fumée, et l'on y pratique deux petites ouvertures sur un même grand cercle de la surface et à égale distance de l'axe (fig. 105). Faisant

alors tomber les rayons solaires sur la lentille, on cherche avec un écran la position pour laquelle les deux faisceaux divergents IS, I'S', qui passent par les trous, laissent des traces S et S' dont la distance soit double de la distance des trous. L'intervalle OB de l'écran au centre optique de la lentille est sensiblement égal à la distance focale cherchée.

CHAPITRE VII

DISPERSION DE LA LUMIÈRE

§ 1. DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE SOLAIRE PAR LA RÉFRACTION.

Le passage d'un faisceau lumineux d'un milieu réfringent dans un autre milieu ne produit pas seulement, quand l'incidence est oblique à la surface de séparation, le phénomène de déviation que nous venons d'étudier sous le nom de *réfraction simple*. Ce phénomène est ordinairement accompagné de modifications qui portent sur la couleur de la lumière transmise. Il est aisé de constater ces modifications, en observant les images des objets tels qu'on les voit au travers d'un prisme ou d'une lentille ordinaire. Nous avons déjà fait remarquer que ces images sont presque toujours bordées de couleurs très vives reproduisant les nuances de l'arc-en-ciel.

Cette coloration des images par la réfraction est ce qu'on nomme la *dispersion de la lumière*. Elle vient de ce que la lumière du Soleil, celle des différentes sources lumineuses, directes ou secondaires, ne sont pas en général des lumières simples ou homogènes : elles sont en réalité composées d'une multitude de rayons de couleurs différentes, dont chacune a un degré particulier de réfrangibilité. En passant au travers d'un milieu réfringent, elles se décomposent : les rayons inégalement réfrangibles se dispersent ; chacun d'eux apparaît alors avec sa couleur propre. De là le phénomène que nous allons étudier maintenant, et qui était depuis longtemps connu par

quelques-uns de ses effets, quand Newton en a découvert la cause et formulé la loi.

Cette dispersion de la lumière blanche par réfraction se manifeste à nous tous les jours par nombre de phénomènes que les anciens connaissaient dès lors certainement comme nous[1], mais sans en avoir soupçonné la cause. Les pierres précieuses, les diamants, lancent des feux de diverses couleurs, et ce n'est pas une des moindres beautés de la précieuse substance de décomposer, à travers ses facettes, les rayons lumineux. L'arc-en-ciel est un phénomène dû à la même cause, comme nous le montrerons dans la description des météores. Il en est de même des couleurs variées dont se teignent les nuages et les couches atmosphériques, à l'instant où ont lieu les crépuscules et les aurores. Enfin, dans les vases en verre contenant des liquides transparents, dans les morceaux de verre taillé dont on orne les lustres, on aperçoit dans certaines directions des franges irisées offrant dans toute leur pureté les couleurs les plus vives.

Si, dans l'intérieur de la chambre obscure, on reçoit directement sur un écran de papier blanc la lumière solaire, après qu'elle a passé par un trou percé dans le volet, l'image du Soleil sur le papier sera, comme on le sait, une tache ronde et blanche. Mais cette lumière blanche n'est pas simple. C'est un composé d'une multitude de couleurs ou de nuances qui sont elles-mêmes autant de couleurs simples. Ce résultat a été mis hors de doute par une suite d'expériences qu'on a variées sous toutes les formes, mais dont la plupart sont dues à Newton. Indiquons les plus concluantes.

1. Sénèque, dans le premier livre de ses *Questions naturelles*, s'efforce de chercher une explication de l'arc-en-ciel et de ses couleurs. Au milieu d'une dissertation passablement longue et diffuse, on rencontre la mention de faits d'observation qui prouvent qu'à l'époque où écrivait le philosophe romain on connaissait plusieurs effets de la réflexion, de la réfraction et de la dispersion de la lumière, les miroirs concaves, les lentilles, etc. « L'eau qui jaillit d'un tuyau rompu, dit-il quelque part, ne présente-t-elle pas quelque chose de pareil aux couleurs de l'arc-en-ciel? » Et plus loin : « On fabrique des baguettes de verre cannelées ou à plusieurs angles saillants, lesquelles, si elles reçoivent transversalement les rayons du soleil, présentent les teintes de l'iris. »

On place sur la route des rayons solaires, après leur passage par le trou rond du volet de la chambre obscure, un prisme triangulaire en flint-glass, par exemple, de manière que ses arêtes soient placées horizontalement et que le faisceau lumineux pénètre obliquement par l'une des faces. Alors on aperçoit sur l'écran, au lieu de l'image ronde et blanche du Soleil, et à une certaine distance au-dessus du point où elle se formait avant l'interposition du prisme, une bande allongée[1] lumineuse, formée d'une suite de couleurs extrêmement vives : c'est cette bande qu'on nomme le *spectre solaire*.

Voici dans quel ordre s'y succèdent les couleurs, quand le prisme a sa base tournée vers le haut ; l'ordre serait inverse si cette base était tournée vers le plancher de la chambre obscure :

A l'extrémité inférieure du spectre est un rouge brillant, vif et plein, auquel succède une teinte orangée, et par gradations insensibles un magnifique jaune-paille. Vient ensuite un vert d'une pureté et d'une intensité remarquables, puis une teinte bleu-verdâtre, et, après, une couleur bleue prononcée qui se fonce jusqu'à l'indigo. Après l'indigo vient le violet, dont la nuance livide termine le spectre. On peut voir dans les planches II et III, figure 1, la suite des couleurs que présente le spectre après la décomposition par le prisme de la lumière blanche du Soleil.

Ainsi un rayon de lumière blanche est bien, comme nous l'avons annoncé, la réunion d'une série de rayons colorés dont nous venons seulement de nommer les principaux ; car la dégradation d'une couleur à la suivante se fait d'une manière

1. Il importe de remarquer que l'image, primitivement ronde, du Soleil se trouve dilatée dans une direction perpendiculaire à l'arête du prisme interposé. Latéralement, la bande a une largeur égale au diamètre de l'image ronde. Si l'on fait varier l'inclinaison du prisme ou l'incidence du faisceau, la bande lumineuse et colorée varie de longueur ; mais il est une position, celle de la déviation minimum, pour laquelle la dilatation de l'image solaire devrait être nulle, si les rayons qui composent le faisceau avaient tous la même réfrangibilité. Or Newton a fort bien remarqué que, pour cette position du prisme, l'allongement de l'image persiste aussi bien que la coloration de ses diverses parties.

insensible, et il n'y a pas, de l'une à l'autre, de changement brusque de nuance, ni de solution de continuité[1].

Une seconde expérience prouve à la fois qu'un rayon de chacune des couleurs du spectre est simple, et que son degré de réfrangibilité va en croissant du rouge au violet. Cette expérience consiste à laisser passer par un petit trou pratiqué dans l'écran, à l'endroit où se forme le rouge par exemple, un étroit

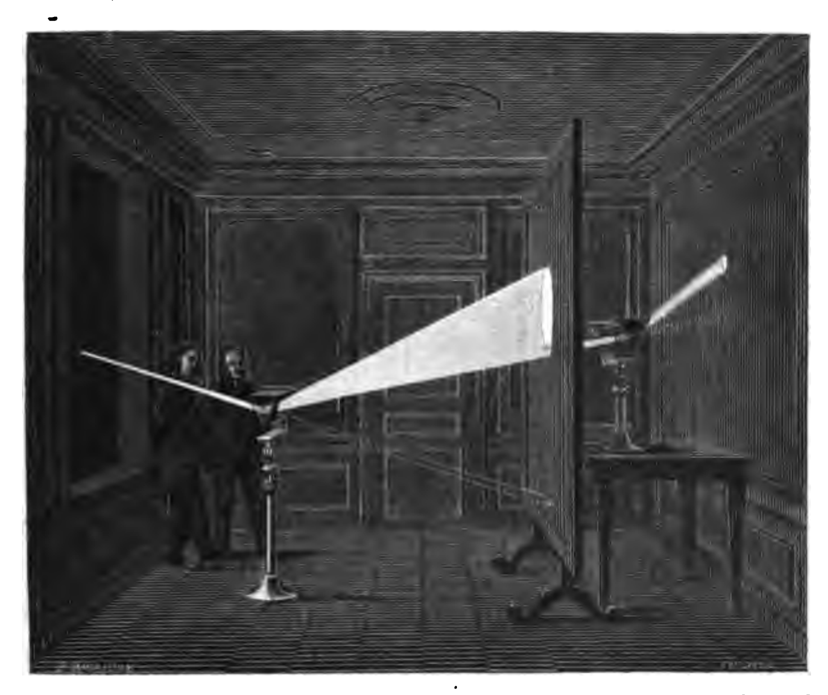


Fig. 106. — Décomposition de la lumière par le prisme. Inégale réfrangibilité des couleurs du spectre.

pinceau de cette couleur. Reçu sur un second écran (fig. 106), ce pinceau forme une image rouge en un point qu'on note avec soin. Si, au lieu de le recevoir directement sur cet écran, on interpose un second prisme, le pinceau lumineux reçoit une nouvelle déviation, et son image va se former en un point plus élevé que l'image directe. Mais la nouvelle image est rouge comme la première, et de même forme si le prisme est conve-

1. Sauf par des raies noires très fines dont nous parlerons plus loin.

nablement placé. La lumière rouge du spectre ne peut donc se décomposer.

Or la même expérience, répétée sur les couleurs successives, donne des résultats analogues. Donc toutes les couleurs du spectre solaire sont indécomposables ou simples. Mais leur réfrangibilité est croissante ; car on remarque que les distances entre les images directes des couleurs sur l'écran et l'image obtenue par la réfraction dans le second prisme sont d'autant plus grandes que la couleur est plus rapprochée de l'extrémité violette du spectre. Il suit évidemment de là que, lorsqu'on donne l'indice de réfraction d'une substance réfringente, il est nécessaire d'indiquer à quelle partie du spectre correspond cet indice. Par exemple, l'indice de réfraction du flint lourd, qui est 1,78 pour le rouge du spectre, est 1,86 pour le violet.

Si, au lieu d'un prisme formé de flint-glass, on emploie un prisme d'une autre substance réfringente, solide ou liquide, on obtient des spectres plus ou moins brillants et plus ou moins allongés ; si les prismes sont incolores, les spectres sont composés des mêmes couleurs, rangées dans le même ordre. Mais leur proportion, les espaces occupés par chacune d'elles, varient suivant la nature de la substance, tandis que l'ordre des couleurs reste le même. C'est le flint-glass qui, parmi les solides, donne le spectre le plus étendu, surtout dans le violet; c'est le sulfure de carbone parmi les liquides.

L'angle du prisme influe aussi sur l'étendue du spectre produit, étendue qui est d'autant plus grande que l'angle est plus ouvert. C'est un fait qu'on vérifie aisément par l'expérience, à l'aide des prismes à angles variables.

Ainsi la lumière blanche se décompose par la réfraction en rayons diversement colorés, et la couleur de chacun des rayons correspond à un degré de réfrangibilité particulier. Voilà pour l'analyse de la lumière.

§ 2. RECOMPOSITION OU SYNTHÈSE DE LA LUMIÈRE.

Mais si telle est en effet la composition de la lumière, il doit en résulter qu'en réunissant, dans une proportion convenable, toutes les couleurs du spectre, le mélange des rayons colorés doit former un faisceau de lumière blanche. Des expériences variées confirment pleinement cette conséquence de l'analyse de la lumière. La plupart de ces expériences sont dues à Newton, qui les décrit dans son *Optique*, et l'on ne fait guère aujourd'hui que les reproduire dans les cours, avec de légères modifications.



Fig. 107. — Recomposition de la lumière par une lentille.

La plus simple de toutes consiste à recevoir sur une lentille convergente le spectre solaire étalé par un prisme. Les rayons diversement réfrangibles qui composent le spectre vont converger en des foyers distincts, mais rapprochés. En plaçant un écran de papier blanc au foyer où se confondent les rayons des diverses couleurs (c'est le foyer conjugué du point où les rayons émergent du prisme), on aperçoit une image blanche du Soleil (fig. 107). En approchant l'écran de la lentille, les rayons de couleur, non réunis encore, reparaissent d'autant

plus vifs que l'écran est plus loin de ce foyer. Au contraire, l'écran est-il éloigné de la lentille, à partir du point de convergence les couleurs reparaissent encore, de sorte que le rouge, précédemment en bas, se trouve placé en haut, et le violet, d'abord en haut, est situé à la partie inférieure de l'image colorée.

A l'aide de deux prismes de même substance et de même angle, mais opposés de position, ainsi que le montre la fig. 108, le faisceau de lumière blanche qui tombe dans le premier prisme se divise en rayons divergents et diversement colorés, mais la réfraction les ramène au parallélisme à leur émergence du second prisme; et alors, au lieu d'un spectre, on obtient un faisceau de lumière blanche composé par la réunion des rayons de diverses couleurs. Seulement, le bord supérieur de l'image reçue sur un écran est rouge, et le bord inférieur est violet. Cela vient de ce que, parmi tous les rayons de lumière blanche formant le faisceau, les rayons moyens seuls donnent lieu à des spectres dont les couleurs se rassemblent ensuite, tandis que les rayons extrêmes du spectre ne se sont superposés avec aucune autre couleur, et la recomposition n'a pu s'effectuer en ces points.



Fig. 108. — Recomposition de la lumière par les prismes.

Deux spectres obtenus au moyen de deux prismes différents et projetés en sens inverse sur un écran donnent du blanc, à l'endroit où les couleurs se superposent.

Le spectre donné par un prisme étant observé avec un second prisme, on retrouve une position pour laquelle l'image reçue dans l'œil est ronde et blanche.

Toutes ces expériences et d'autres encore sont décrites par

Newton avec une clarté et une simplicité admirables. « Jusqu'ici, dit-il, j'ai produit du blanc en mêlant les couleurs des prismes. Maintenant, pour mêler les couleurs des corps naturels, prenez de l'eau un peu épaissie avec du savon, et agitez-la jusqu'à ce qu'elle s'élève en écume. Après que cette écume sera un peu reposée, vous n'avez qu'à la regarder attentivement, et vous verrez partout diverses couleurs sur la surface de chacune des bulles dont cette écume est composée. Mais si vous vous éloignez au point de ne pouvoir plus distinguer les couleurs l'une de l'autre, toute l'écume vous apparaîtra d'une parfaite blancheur. » (*Optique*, liv. I.)

Il essaya aussi d'obtenir la couleur blanche par le mélange, en proportions diverses, de certaines poudres colorées. De l'orpiment (sulfure d'arsenic de couleur jaune-orangé) mélangé de pourpre, de vert-de-gris et d'azur lui donna un composé d'un gris cendré qui, exposé au soleil et comparé à un morceau de papier blanc de même grandeur posé à côté du mélange et à l'ombre, parut d'un blanc éclatant. Newton explique la couleur grise des mélanges de ce genre par l'absorption de la lumière des éléments, et c'est pour obvier à cette diminution d'éclat qu'il jugea convenable d'éclairer fortement le composé par les rayons solaires.

Enfin, si l'on fait tourner rapidement un cercle, divisé en secteurs qu'on a colorés des couleurs principales du spectre, autour d'un axe qui passe par son centre (fig. 109), on voit, à mesure que la rotation devient plus rapide, les couleurs disparaître à l'œil. Le disque prend une teinte d'autant plus blanche que la proportion des diverses couleurs aura été mieux observée. On comprend qu'alors, les impressions successives des diverses couleurs sur la rétine se confondant, grâce à la rapidité du mouvement, les choses se passent comme si les rayons faisaient leur impression simultanément, et la sensation qui en résulte est celle de la couleur blanche.

Toute lumière dont le Soleil est la source, celle des nuages, de l'atmosphère, la lumière de la Lune et des planètes, donne

lieu aux mêmes phénomènes de décomposition et de recomposition. Analysées à l'aide du prisme, elles produisent des spectres d'éclat très variable, mais dont la composition en rayons colorés est précisément celle du spectre solaire.

Les lumières provenant d'autres sources, des étoiles, des flammes artificielles, du dégagement de l'électricité soit dans les appareils de physique, soit dans les orages, donnent toutes des spectres, dans lesquels les couleurs sont disposées dans le même ordre que les couleurs du spectre solaire. Mais, en général, le phénomène est moins brillant ; et, comme nous le verrons bientôt, il arrive que telles ou telles couleurs manquent, et alors elles se trouvent remplacées par des bandes obscures.



Fig. 109. — Recomposition de la lumière par un disque tournant.

Les expériences qui servent à montrer que les diverses couleurs du spectre donnent, par leur réunion, de la lumière blanche, sont aussi concluantes quand on emploie les rayons colorés du spectre, que si l'on se sert des couleurs des corps éclairés. Cela seul suffirait pour prouver que ces dernières couleurs sont, comme celles des sources lumineuses, inégalement réfrangibles. Mais Newton a fait des expériences directes sur cette différence. Il a examiné, à l'aide d'un prisme, un morceau de papier dont les deux moitiés étaient peintes de couleurs différentes, l'une rouge, l'autre bleue ; et, en disposant le prisme et le papier au devant d'une fenêtre, comme l'indique la figure 110, il a remarqué que les deux moitiés du papier paraissaient inégalement déviées, la moitié bleue se trouvant transportée un peu plus haut que la moitié rouge, de sorte que

le morceau de papier parut divisé en deux parties, dont l'une n'était plus le prolongement de l'autre. Le contraire arrivait (le



Fig. 110. — Inégales réfrangibilités des diverses couleurs.

bleu plus bas que le rouge), si l'angle du prisme était placé en sens inverse. Ainsi le bleu était plus réfrangible que le rouge.

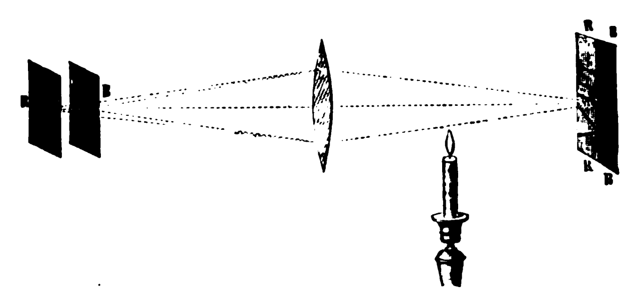


Fig. 111. — Inégales réfrangibilités des couleurs simples. Expérience de Newton.

En recevant derrière une lentille et sur un écran de papier blanc les images du même papier éclairé par une chandelle,

Newton reconnut pareillement qu'il fallait placer l'écran à des distances différentes pour obtenir des images nettes de la moitié rouge et de la moitié bleue. Un fil de soie très noire, qui entourait le papier plusieurs fois, permettait de juger avec plus de facilité l'endroit où l'image de chaque couleur se faisait avec netteté; car, en d'autres points, les raies noires étaient mal terminées et confuses. Pour la moitié bleue, la distance de l'image à la lentille se trouva plus petite que pour la moitié rouge, ce qui montre encore que le bleu est plus réfrangible que le rouge. Ces deux expériences sont les premières que Newton décrit dans son *Optique*.

§ 3. LES RAIES DU SPECTRE SOLAIRE. — ANALYSE SPECTRALE.

Joseph Frauenhofer, né en 1787, à Straubing, petite ville de Bavière, était fils d'un simple vitrier. Il fut d'abord ouvrier tailleur de verres, mais, à force de travail et de persévérance, il parvint à mériter la réputation du plus savant et du plus habile opticien de notre siècle. Frauenhofer ne se borna point à apporter à la construction des instruments d'optique une perfection jusqu'alors inconnue; observateur consommé, il se servit des appareils qu'il fabriquait, pour faire différentes découvertes, parmi lesquelles celle que nous allons décrire est à coup sûr une des plus curieuses et des plus fécondes en conséquences.

Newton, en étudiant les diverses parties du spectre solaire, n'avait rien pu distinguer qui servît de limite précise aux diverses couleurs : elles paraissaient se fondre les unes dans les autres d'une manière insensible et sans interruption apparente. Persuadé, par ses expériences, que les rayons colorés de la lumière blanche possèdent, de l'extrême rouge à l'extrême violet, tous les degrés possibles de réfrangibilité, il regardait chacun de ces rayons comme simple et homogène, et pensait que la lumière décomposée par le prisme était étalée d'une manière continue sur toute l'étendue du spectre.

C'est en cherchant à mesurer les indices de réfraction des rayons colorés, et en s'efforçant de trouver dans le spectre des points singuliers propres à lui servir de repère, que Frauenhofer découvrit ce fait capital, que la lumière du spectre solaire n'est pas continue, qu'elle est sillonnée d'une multitude de raies fines et sombres[1], formant dès lors autant d'interruptions brusques dans la bande lumineuse.

Il employa dans cette expérience, qui exige les précautions les plus délicates, un prisme de flint-glass d'une grande pureté, exempt de stries, sur lequel venait tomber le faisceau solaire après avoir passé par une fente étroite parallèle à l'arête du prisme. Le spectre ainsi obtenu, étant observé avec une lunette qui en grossissait les dimensions, lui donna, au lieu d'une bande continue où les couleurs se fondaient sans interruption,

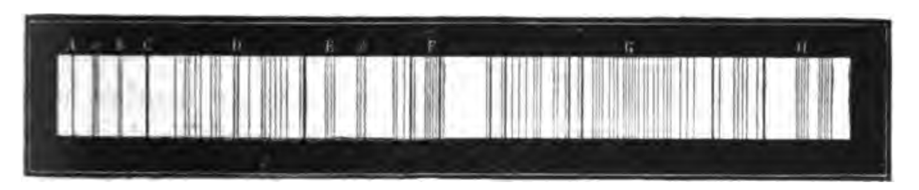


Fig. 112. — Spectre solaire. Raies de Frauenhofer.

un ruban rayé dans le sens de sa largeur d'une multitude de raies obscures et même totalement noires, très inégalement réparties dans toute l'étendue du spectre. La distribution de ces raies ne paraissait point d'ailleurs en rapport avec les teintes des couleurs principales.

Frauenhofer varia de toutes les manières possibles son expérience; mais, tant que la source lumineuse employée fut la lumière du Soleil, soit directe, soit réfléchie, les mêmes lignes sombres apparurent toujours, conservant entre elles les mêmes rapports d'ordre et d'intensité. Si, au lieu d'un prisme de flint-glass, on se sert d'un prisme d'une autre substance solide ou

1. Wollaston, en 1802, avait bien reconnu l'existence de deux lignes sombres fixes dans le spectre que forme un prisme de flint-glass : l'une de ces lignes était dans le bleu, l'autre dans le vert. Mais, ainsi que le remarque Brewster dans son *Traité d'optique*, « cette découverte n'excita alors l'attention de personne, et ne fut pas continuée par son savant auteur. »

liquide, les distances seules des raies varient, mais d'ailleurs elles occupent toujours les mêmes positions relativement aux couleurs du spectre.

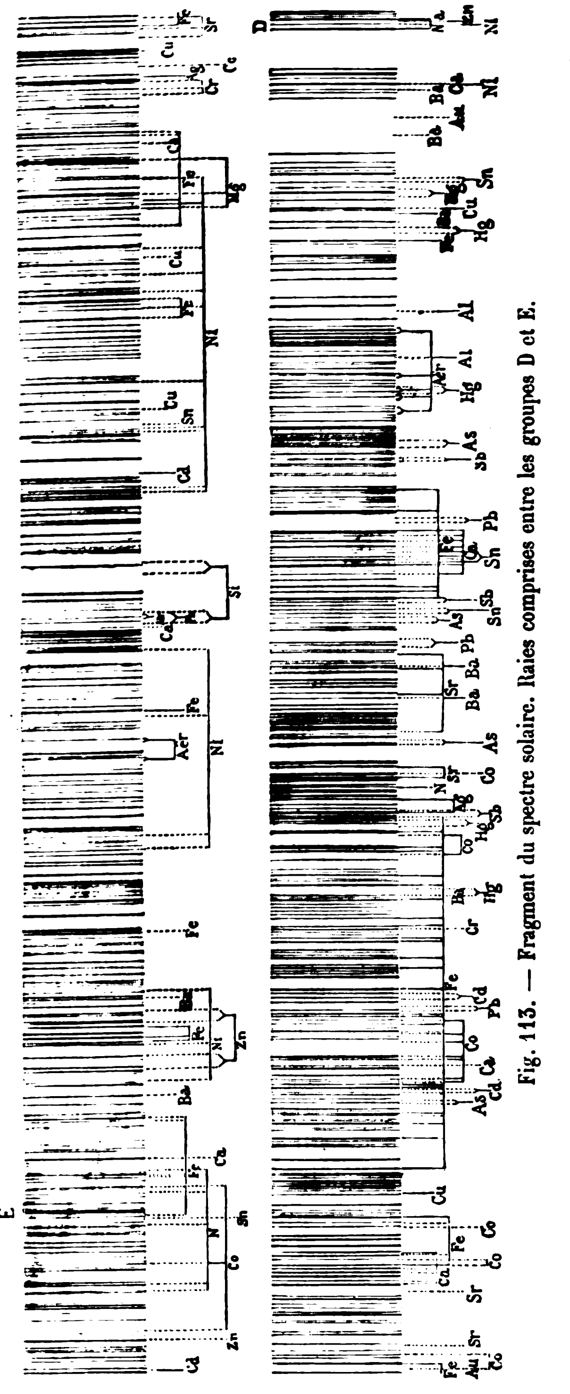


Fig. 113. — Fragment du spectre solaire. Raies comprises entre les groupes D et E.

L'illustre opticien de Munich étudia avec un soin infini ce remarquable phénomène; il fixa avec une précision extrême les positions de 580 raies obscures; et, pour servir de points de repère et de comparaison, il distingua dans ce nombre huit raies principales, qu'il désigna par les premières lettres de l'alphabet. Le spectre solaire des planches II et III donne la position de ces raies, telles qu'on les obtient avec un prisme rempli de sulfure de carbone; la figure 112, outre les raies principales de Frauenhofer dont nous parlons, en renferme d'autres parmi les premières raies découvertes, qui donnent une idée du phénomène observé à l'aide d'un seul prisme.

Comme on peut s'en assurer, les raies A, B, C, se trouvent toutes les trois dans le rouge, la première à l'extrémité du spectre, la seconde au milieu du rouge, et la troisième à peu de distance de l'orangé. La raie double D forme à peu près la limite de l'orangé du côté du vert; E est au milieu de cette dernière couleur; F au milieu du bleu; G et la double raie H sont l'une à la fin de l'indigo vers le bleu, l'autre à la fin du violet. Deux autres groupes de raies ont été désignés par les lettres *a* et *b*, l'un dans le rouge, l'autre dans le vert.

Depuis 1817, époque à laquelle Frauenhofer découvrit les raies qui portent son nom, de nouvelles lignes sombres ont été observées, et l'on évaluait, il y a quelques années, à plus de 2000 celles dont la position avait été déterminée. Aujourd'hui ce nombre est doublé. M. Thollon, appliquant à l'analyse de la lumière solaire un spectroscope à vision directe de son invention[1], a obtenu un spectre de 10 mètres de longueur entre les raies A et H. Sur cette étendue, il a pu dessiner 4000 raies. Le spectre obtenu par Angstrom contenait 1600 raies sur une longueur de 3 mètres.

On peut se faire une idée de cette multitude de stries par

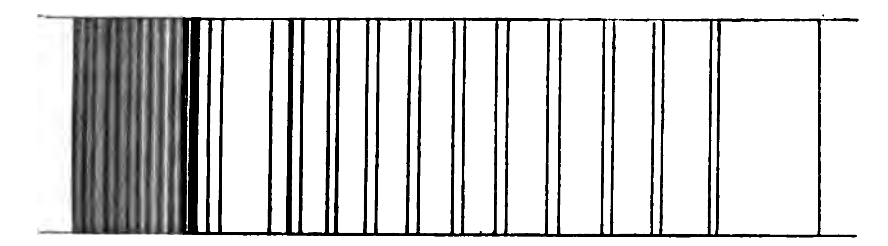


Fig. 114. — Raies du groupe B vues dans le spectroscope à vision directe de M. A. Thollon.

l'examen de la figure 113, qui reproduit une portion du spectre solaire comprise entre les raies principales D et E. Les figures 114, 115 et 116, qui représentent les groupes B, D et *b* de Frauenhofer, donnent une idée de la richesse des détails que le perfectionnement des procédés d'observation permet aujour-

1. Le spectroscope de M. Thollon a un pouvoir dispersif énorme, qui équivaut, dit-il, à celui de 16 prismes à sulfure de carbone de 60° ou de 31 prismes de flint.

d'hui d'explorer. Brewster, un des physiciens qui se sont le plus occupés de ces recherches, outre les précautions indispensables pour obtenir un spectre bien net et bien pur, augmentait la sensibilité de sa vue à l'aide du gaz ammoniac, dont l'action dissolvante détruit le voile fluide qui recouvre la surface de l'œil.

Fig. 115. — Raies du groupe D, d'après M. Thollon.

Frauenhofer ne se borna point à étudier les lignes qui rompent la continuité de la lumière dans le spectre solaire. Il appliqua ses belles méthodes d'observation aux spectres des autres sources de lumière. Et d'abord, comme on pouvait le pressentir, il trouva les mêmes raies dans les sources lumineuses qui renvoient par réflexion la lumière du Soleil : la lumière des nuages ou du ciel pur, celle de la Lune et des planètes. Les raies y sont, à la vérité, d'une intensité moindre. En observant les étoiles les plus brillantes, par exemple le spectre de Sirius, il trouva que ce spectre est aussi strié de raies sombres; mais ces raies, beaucoup moins nombreuses, ne sont pas distribuées

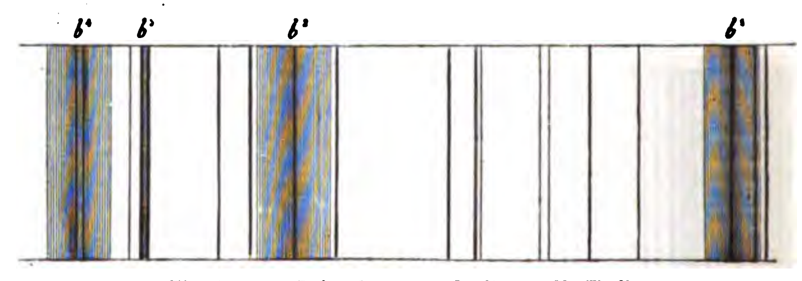


Fig. 116. — Raies du groupe *b*, d'après M. Thollon.

de la même façon que dans le spectre solaire; d'ailleurs, elles changent aussi d'une étoile à une autre. Enfin, il appliqua la même méthode à la lumière électrique : au lieu de raies sombres, il vit dans le spectre de cette lumière un certain nombre de raies lumineuses.

Telles sont les célèbres expériences qui ont servi de point de départ à une série de brillantes découvertes, dont l'ensemble constitue aujourd'hui une des branches les plus importantes de

l'optique et, pour la chimie, la plus ingénieuse et la plus délicate méthode d'analyse. Essayons maintenant de donner une idée de cette méthode, connue sous le nom d'*analyse spectrale*.

§ 4. ANALYSE SPECTRALE. — MÉTHODE, INSTRUMENTS ET PROCÉDÉS D'OBSERVATION.

Le spectre solaire et les spectres stellaires sont, comme on vient de le voir, sillonnés de raies sombres qui indiquent des interruptions dans l'émission de la lumière et prouvent, contrairement à ce qu'on avait cru d'abord, qu'il n'y a pas, dans ces sources, de rayons possédant tous les degrés possibles de réfrangibilité. Le contraire a lieu pour les spectres des corps incandescents à l'état solide ou à l'état liquide : les spectres de leurs lumières sont continus.

D'autres sources lumineuses donnent des résultats différents. Quand on introduit dans une flamme artificielle, par exemple dans celle d'un bec de gaz ou d'une lampe à alcool, certaines substances métalliques que la haute température de la source réduit à l'état de vapeurs, on n'observe plus de spectres continus, mais quelques raies brillantes séparées par de larges intervalles obscurs. C'est ce qu'avait déjà remarqué Frauenhofer.

Depuis, le même fait a été étudié sous toutes ses faces et par diverses méthodes. On a reconnu que les raies brillantes des vapeurs métalliques varient en nombre et en position suivant la nature du métal; leur intensité varie aussi avec la température; mais, de même que les raies noires du spectre solaire, elles occupent toujours les mêmes positions relatives, dont on a déterminé la concordance avec quelques-unes des premières.

On donne le nom de *spectroscopes* aux instruments qui servent à analyser les diverses sources de lumière, c'est-à-dire à étudier la composition des spectres que produisent ces lumières, lorsqu'elles sont réfractées par un ou plusieurs prismes.

Mais, avant d'insister sur les caractères que présentent les

lumières émanées de sources différentes, quand on compare leurs spectres, il est nécessaire d'entrer dans quelques détails sur les procédés d'observation et de décrire les appareils le plus ordinairement employés.

Les figures 117, 118 et 119 représentent un spectroscope à un seul prisme, le plus employé pour les expériences ordinaires. Au centre d'une plate-forme circulaire horizontale portée par un pied, se trouve disposé verticalement le prisme P, qui est le plus souvent en flint lourd très pur, et dont l'angle est de 60°. Deux corps de lunette C et B sont placés symétriquement par rapport aux faces latérales du prisme et dans la

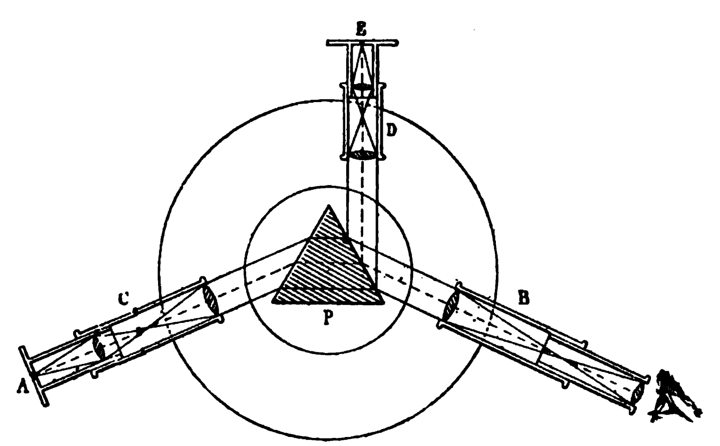


Fig. 117. — Spectroscope horizontal. Marche du faisceau lumineux.

position de la déviation minimum eu égard aux faisceaux qui les traversent et qui sont réfractés par le prisme. La lunette C porte à son extrémité la plus éloignée du prisme, à la place de l'oculaire, une plaque métallique percée d'une fente verticale très fine (qu'on peut d'ailleurs rétrécir ou élargir à volonté). Devant cette plaque A se place la source lumineuse à analyser. Les rayons lumineux qui traversent la fente sont rendus parallèles par un système de deux lentilles, de sorte que c'est un faisceau vertical qui pénètre dans le prisme, s'y réfracte, et en sortant va tomber sur l'objectif de la lunette B. C'est en mettant l'œil à l'oculaire de cette seconde lunette que l'observateur va pouvoir étudier le spectre produit par la dispersion.

En E se trouve, en avant d'un troisième corps de lunette D, une plaque de verre sur laquelle est tracée une échelle micrométrique de divisions équidistantes très fines : cette échelle est disposée horizontalement et éclairée par une bougie. On oriente la lunette D de façon que l'image du micromètre E tombe sur la face latérale du prisme d'où émerge le faisceau lumineux de la source, et se réfléchisse précisément selon l'axe de la lunette B.



Fig. 118. — Spectroscope horizontal.

Tout étant ainsi disposé, si l'on met l'œil à l'oculaire de celle-ci, on aperçoit très nettement d'une part le spectre étalé de la source qu'on étudie, avec toutes ses couleurs et ses raies, et d'autre part l'image du micromètre qui se superpose à la première et par conséquent divise le spectre en parties équidistantes et numérotées. On peut donc noter la position exacte occupée par telle ou telle couleur, ou par une raie déterminée du spectre observé.

On peut aussi comparer directement les parties de même réfrangibilité des spectres de deux sources différentes. Pour cela, on fixe à la partie supérieure de la fente du collimateur C un petit prisme en verre à réflexion totale, qui reçoit latéralement les rayons de la seconde source et les envoie dans l'axe de la lunette. Le faisceau est dispersé comme celui de la source qui est placée directement devant la fente. Alors l'observateur, en mettant l'œil à l'oculaire convenablement mis au point, voit les deux spectres disposés horizontalement l'un au-dessus de l'autre, position qui permet de reconnaître les raies communes ou de mesurer la différence de réfrangibilité de raies voisines.

Quand on observe, on a soin de recouvrir le prisme d'un tambour noirci à l'intérieur, de façon à éviter l'accès et l'influence des lumières étrangères. Cette pièce (fig. 118) est d'ailleurs percée de trois orifices circulaires, en regard des trois tubes du spectroscope.

Pour obtenir une dispersion plus forte et par suite des spectres plus étendus, permettant une étude plus complète des raies



Fig. 119. — Observation spectroscopique d'un solide métallique.

et de leurs subdivisions, on emploie des spectroscopes à plusieurs prismes. La figure 120 représente, en plan, un de ces appareils où la lumière passe successivement à travers six prismes. On comprend que l'emploi des spectroscopes polyprismes est limité à l'analyse des lumières d'une grande puissance, puisque, en traversant une épaisseur aussi considérable de substances réfringentes, le faisceau perd de son intensité à chaque réfraction. On obtient un spectre beaucoup plus étendu, il est vrai, mais beaucoup plus faible.

Dans les spectroscopes que nous venons de décrire, les faisceaux incidents et émergents font entre eux un certain angle, de sorte que l'observateur ne vise point directement la source de lumière qu'il analyse. Mais on construit aussi, pour la commodité des observations, principalement des observations astronomiques, des ***spectroscopes à vision directe***, où un même tube de lunette contient à la fois la mire ou fente par où vient la lumière, l'appareil dispersif et la lunette à laquelle est adapté l'oculaire.

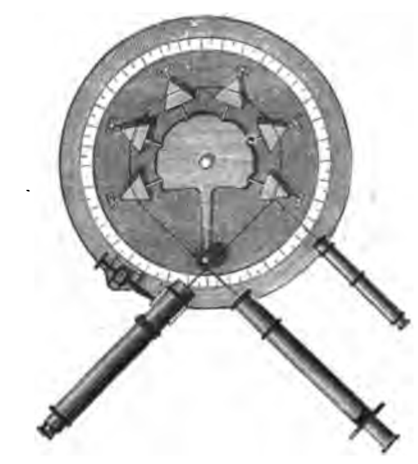


Fig. 120. — Spectroscope horizontal à prismes multiples.

Entrons maintenant dans quelques détails sur les divers procédés d'observation employés selon la nature des sources lumineuses qu'il s'agit d'analyser.

Nous avons vu que la lumière solaire, directe ou réfléchie, donne un spectre de couleurs vives, sillonné d'un nombre considérable de raies obscures plus ou moins fines, tandis que le spectre d'un liquide ou d'un solide incandescent (d'un bain de métal en fusion, d'un fer rouge par exemple) est absolument continu. Quant aux gaz incandescents, le spectre de leur lumière est discontinu : il est constitué par un nombre limité de lignes brillantes ou de bandes lumineuses, que séparent de larges intervalles obscurs. Mais cela suppose que la flamme du gaz analysé ne contient en suspension aucune particule solide ou liquide : si cette condition n'est pas remplie, si, comme il arrive pour les flammes éclairantes d'une bougie, d'un bec de gaz ordinaire, des particules solides de carbone existent dans la source lumineuse, alors le spectre est

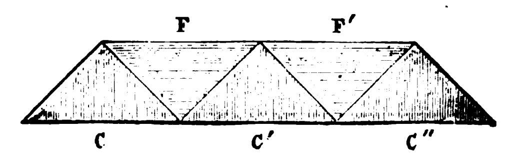


Fig. 121. — Disposition des prismes dans un spectroscope à vision directe.

continu comme dans le cas des solides et liquides incandescents[1]. Il semble toutefois qu'il y ait des exceptions à cette loi. Par exemple, la flamme d'un bec à gaz dans lequel on fait arriver un excès d'air, donne un spectre continu, tandis qu'il devrait être formé de raies brillantes. A la vérité, ces bandes existent, et c'est la faible intensité du spectre qui, en rendant ces bandes imperceptibles, fait croire à la continuité. Or c'est précisément cette circonstance qui permet de se servir d'un bec de Bunsen pour l'observation spectroscopique des corps solides, quand ces corps sont aisément vaporisables, ce qui est le cas des métaux alcalins ou terreux.

Pour étudier les spectres de ces corps simples, on introduit dans la flamme un fil de platine imprégné d'une dissolution saline de l'un d'eux. L'eau commence par s'évaporer, le sel en dissolution se vaporise à son tour, et l'on voit apparaître dans le spectre les raies caractéristiques du métal (voy. pl. II).

Quand le corps est difficilement volatilisable, on en obtient le spectre en faisant éclater l'étincelle d'induction d'une bobine Ruhmkorff entre deux électrodes formées du métal en question. Comme alors la lumière se produit dans un milieu gazeux, le spectre qu'on obtient est un mélange du spectre du gaz et de celui du métal. Il faut donc pouvoir distinguer les raies brillantes qui appartiennent à chacun d'eux. Or on a constaté que les raies du spectre métallique se montrent principalement dans les parties de l'étincelle les plus voisines des pôles : c'est la partie intermédiaire qui renferme plus spécialement les raies du milieu gazeux.

Du reste, on fait cette distinction des deux genres de raies à l'aide de dispositions particulières dont nous allons donner la

1. Il est d'autres cas où le spectre d'un gaz n'est pas discontinu : si l'on fait brûler dans l'oxygène l'un des gaz suivants : hydrogène, oxyde de carbone, hydrogène sulfuré, sulfure de carbone, le spectre de leurs flammes ne renferme aucune raie ni bande, brillante ou sombre. Il est vrai qu'il ne s'agit point là de gaz simples. On doit aussi remarquer que tout solide incandescent ne donne pas un spectre continu. MM. Bahr et Bunsen ont reconnu que l'erbine calcinée dans la flamme d'un chalumeau à gaz ne se fond pas, mais répand une lumière verte qui, analysée par le prisme, donne un spectre à raies brillantes, c'est-à-dire discontinu. Le même phénomène s'observe pour le didyme.

SPECTRES DES MÉTAUX

1 — Spectre du Soleil

2	Spectre du Sodium		5	Spectre du Calcium	
3	— du Potassium		6	— du Strontium	
4	— du Lithium		7	— du Barium	

description. La figure 122 représente le tube qu'a imaginé M. Plücker pour l'analyse spectrale des gaz. Il se compose de deux tubes de 2 à 3 centimètres de longueur et de 5 à 10 millimètres de diamètre intérieur, que relie un tube presque capillaire soudé aux deux premiers et formant avec eux des angles plus ou moins ouverts. Aux deux extrémités des tubes larges sont fixés deux fils de platine qui pénètrent à l'intérieur par une extrémité et ressortent recourbés au dehors par l'autre extrémité. Après avoir fait le vide et introduit le gaz à la pression voulue, à l'aide d'une tubulure latérale, on ferme celle-ci à la lampe. Si alors on met les fils en communication avec les pôles d'une bobine d'induction, on voit apparaître d'un fil à l'autre une lumière qui, dans la partie rétrécie du tube, offre l'aspect



Fig. 122. — Analyse spectrale des gaz. Tube de Plücker.



Fig. 123. — Analyse spectrale des gaz. Tube de M. Geissler.

d'une ligne de feu continue. C'est cette ligne de lumière qu'on place en avant de la fente du spectroscope. Dans l'appareil de Geissler (fig. 123), les trois tubes sont sur le prolongement l'un de l'autre.

Voici (fig. 124) une autre disposition due à M. Salet : Un gros tube de verre de 1 1/2 à 2 centimètres de diamètre, de 15 à 20 centimètres de longueur, est fermé à l'un de ses bouts, et porte à l'autre bout un bouchon en caoutchouc percé de deux ouvertures par où pénètrent à l'intérieur deux tubes concentri-

ques étroits renfermant les fils des rhéophores, et un autre tube recourbé servant à faire le vide dans l'appareil et à y introduire le gaz à expérimenter. Les fils métalliques se recourbent à l'intérieur du gros tube, et se trouvent ainsi en regard, de façon qu'en mettant leurs extrémités extérieures en communication avec les pôles d'une bobine, l'étincelle éclate et produit ainsi dans le gaz la lumière qu'on observe ensuite à l'aide du spectroscope.



Fig. 124. — Analyse spectrale des gaz. Appareil de M. Salet.

Les spectres des principaux gaz simples sont représentés dans la planche III avec leurs raies caractéristiques. Mais il ne faut pas oublier que ces raies varient de nombre et d'éclat pour un même gaz, suivant que la pression est plus ou moins grande. L'apparence spectrale varie aussi suivant la température du gaz et selon la tension de l'étincelle électrique qui produit l'incandescence[1]. Ainsi la substitution d'un condensateur ou d'une machine de Holtz à la bobine de Ruhmkorff suffit à modifier le phénomène. Pour que les observations spectroscopiques soient comparables, il est donc nécessaire qu'elles soient faites dans les mêmes conditions physiques, et avec des instruments de même puissance.

Les procédés d'observation viennent d'être sommairement

1. Par exemple, le soufre volatilisé dans un tube de Plücker et chauffé à une haute température donne « une magnifique lumière d'un bleu tendre qui se résoudra par le prisme en bandes fort régulières dans lesquelles un fort grossissement permet d'apercevoir de fines lignes noires. Si l'on fait communiquer chaque pôle de la bobine d'induction qui sert à faire l'expérience avec une des armatures d'une bouteille de Leyde, l'étincelle dans l'air sera plus nourrie; dans le tube de Plücker, elle sera plus lumineuse, et elle changera de couleur et d'aspect, si l'on chauffe un peu plus ou si l'on emploie un appareil d'induction un peu plus fort. La décharge deviendra filiforme bleu-verdâtre et son spectre sera exclusivement composé de traits déliés et brillants. Ces deux spectres s'observent quel que soit le métal des électrodes; ils sont à un même degré caractéristiques du soufre, mais ils n'ont absolument rien de commun et ne se transforment pas l'un dans l'autre par transition insensible. » (G. Salet, art. LUMIÈRE du *Dictionnaire de chimie* de M. Wurtz.)



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180

1

A a B C D E b F G h H_1 H_2

H 2

Cl 3

Br 4

O 5

Az 6

I 7

SPECTRES DES MÉTALLOIDES

1 — Spectre du Soleil

2 Spectre de l'Hydrogène	5 Spectre de l'Oxygène
3 —— du Chlore	6 —— de l'Azote
4 —— du Brôme	7 —— de l'Iode

exposés : entrons maintenant dans quelques détails sur quelques-uns des principaux résultats obtenus.

§ 5. SPECTRES DES MÉTAUX ET DES MÉTALLOÏDES. — PRINCIPAUX GAZ SIMPLES. DÉCOUVERTE DE NOUVEAUX MÉTAUX PAR L'ANALYSE SPECTRALE.

On vient de voir que, pour obtenir le spectre d'un métal, par exemple celui du sodium, on introduit dans la flamme de la lampe un fil de platine imprégné d'une dissolution concentrée d'un sel dont ce métal forme la base, de sel marin (chlorure de sodium) je suppose. Aussitôt on voit apparaître une raie jaune d'une grande intensité et aux contours très nets. C'est la raie principale du spectre du sodium, telle qu'on peut la voir dans la planche II. Le lithium donne deux raies principales, l'une jaune d'un faible éclat, l'autre rouge et brillante ; le potassium fournit deux raies caractéristiques, une rouge, une violette ; d'autres raies jaunes et vertes les accompagnent. Le calcium donne une raie verte très vive, une orangée, une bleue. Le strontium, huit raies, dont six sont rouges, une orangée, une bleue ; le baryum, deux raies vertes, d'autres dans le jaune et le bleu ; le thallium, une raie unique, de couleur verte et remarquable par son éclat.

Un grand nombre de corps simples ont été étudiés de cette manière, les raies brillantes de leurs spectres reconnues et fixées de position, de sorte qu'il suffit d'examiner et de comparer aux résultats dont nous parlons le spectre d'une flamme, pour qu'on puisse en déduire la nature des vapeurs métalliques qui s'y trouvent en dissolution. De là, on le comprend, une nouvelle méthode d'analyse pour la chimie, méthode si délicate et si sensible, que la millionième partie d'un milligramme de sodium suffit pour qu'on voie aussitôt apparaître la raie jaune caractéristique du spectre de ce métal. Deux chimistes et physiciens allemands, MM. Kirchhoff et Bunsen, ont dès le début porté l'analyse spectrale à un grand degré de précision. « Je prends, dit M. Bunsen, un mélange des chlorures des métaux alcalins et alcalino-terreux, sodium, potassium, lithium, ba-

ryum, strontium et calcium, contenant au plus un cent-millième de milligramme de chacune de ces substances; je place ce mélange à la flamme, et j'observe le résultat. D'abord la ligne jaune intense du sodium apparaît sur le fond d'un spectre continu très pâle; quand elle commence à être moins sensible, et que le sel marin s'est volatilisé, les faibles lignes du potassium apparaissent; elles sont suivies de la ligne rouge du lithium, qui disparaît bientôt, tandis que les raies vertes du baryum brillent dans toute leur intensité. Les sels de sodium, de potassium, de lithium, de baryum sont alors entièrement volatilisés; quelques instants après, les lignes du calcium et du strontium se montrent, comme si un voile se dissipait, et atteignent peu à peu leur forme et leur éclat caractéristiques. »

A l'aide de l'analyse spectrale, on constate aisément la présence du sodium dans l'air et dans les poussières qu'il tient en suspension. La sensibilité de réaction de ce métal est si forte, que les observateurs du spectroscope sont obligés de s'entourer de toutes sortes de précautions pour que cette réaction ne se manifeste pas aussitôt par la présence de la raie jaune dans le spectre : il suffit d'épousseter un livre dans le voisinage de l'instrument pour que cette raie se montre aussitôt.

Six nouveaux métaux ont été découverts par cette méthode : les deux premiers, le cæsium et le rubidium, par MM. Bunsen et Kirchhoff; le troisième, le thallium, par M. Crookes et M. Lamy; le quatrième, l'indium, par MM. Reich et Richter; le cinquième, le gallium, par M. Lecoq de Boisbaudran, et le sixième, le scandium, par M. Nilson. Le nom du cæsium lui vient de deux raies bleues; celui du rubidium, des raies rouges qui caractérisent les spectres de ces métaux; le nom du thallium rappelle la raie verte caractéristique de ce métal, et celui de l'indium une raie bleue située dans l'indigo. Le gallium et le scandium (des noms de la France et de la Scandinavie, patries des inventeurs) ont, le premier deux raies dans le violet, le second un grand nombre de lignes, principalement dans le jaune.

CHAPITRE VIII

ANALYSE SPECTRALE DES CORPS CÉLESTES

§ 1. APPLICATIONS DE LA SPECTROSCOPIE A L'ASTRONOMIE : CONSTITUTION PHYSICO-CHIMIQUE DU SOLEIL, DES PLANÈTES, DES COMÈTES.

Jusque-là le spectroscope, quelque admirables que soient les progrès qu'il avait fait faire à l'analyse chimique, n'était pas sorti du domaine des laboratoires : il permettait d'analyser, de reconnaître des substances terrestres que nous pouvons voir ou toucher, indiquant même la présence de corps jusqu'alors inconnus. Mais ce n'est pas à cela que devait se borner sa puissance. Grâce à lui, on est allé plus loin ; on a pu aborder et résoudre en partie un problème qui paraissait inaccessible aux investigations humaines : étudier la composition chimique des astres, celle du Soleil, celle des étoiles, ces soleils si prodigieusement éloignés de nous, celle des nébuleuses que les télescopes nous montrent plongées à de telles distances dans les abîmes de l'éther, que l'imagination peut à peine en sonder la profondeur.

Voici, en quelques lignes, les expériences qui ont conduit à un si merveilleux résultat :

Plaçons la flamme d'un bec de gaz en avant de la lunette du spectroscope, et affaiblissons-la au point de n'avoir plus qu'une flamme bleuâtre, à peine sensible. En cet état, elle ne fournit pas de spectre ; il y a obscurité complète derrière le prisme. Mais qu'on introduise un sel métallique dans la flamme, un peu

de sel marin par exemple : aussitôt apparaît la raie jaune du sodium ; c'est ce que nous venons de voir tout à l'heure.

Si, en même temps et dans le même prisme, on introduit un rayon du Soleil, de façon que le spectre du sodium et le spectre solaire se superposent, on remarquera une coïncidence parfaite dans la position de la raie jaune du sodium et de la double raie sombre D de Frauenhofer.

Maintenant, à la lumière du Soleil substituons la lumière intense connue sous le nom de *lumière de Drummond*, — on l'obtient en brûlant un fragment de chaux dans un bec de gaz mélangé d'oxygène ; — le spectre de cette lumière, vu isolément, offre un vif éclat et une continuité parfaite : il ne contient aucune des lignes sombres du spectre solaire. Mais si l'on fait en sorte qu'il recouvre exactement le spectre du sodium, en interposant la lumière Drummond entre le prisme et la flamme sodée, aussitôt la ligne jaune du sodium disparaît et fait place à une ligne obscure, occupant précisément la même position que la raie brillante.

C'est ce phénomène que M. Kirchhoff a désigné sous le nom de *renversement du spectre des flammes*. Il a été constaté sur un assez grand nombre de spectres métalliques. « Si l'on fait arriver, dit-il, un rayon solaire au travers d'une flamme de lithium, on voit apparaître dans le spectre, à la place de la raie rouge, une raie obscure qui rivalise par sa netteté avec les raies de Frauenhofer les plus caractéristiques, et qui disparaît lorsqu'on enlève la flamme de lithium. Le renversement des raies brillantes des autres métaux s'obtient moins facilement ; cependant nous avons été assez heureux, M. Bunsen et moi, pour renverser les raies les plus brillantes du potassium, du strontium, du calcium et du baryum..... »

Maintenant, quelle conséquence tire-t-on de ce fait singulier? C'est que les vapeurs métalliques, douées de la propriété d'émettre en abondance certains rayons colorés, de préférence aux autres, absorbent au contraire ces mêmes rayons émanés d'une source lumineuse et traversant la première source. Ainsi,

la lumière du sodium, qui émet des rayons jaunes d'une réfrangibilité déterminée, absorbe précisément les rayons jaunes de même réfrangibilité de la lumière Drummond, à leur passage dans la première. De là cette raie noire qui vient se placer, dans le spectre continu, à la place qu'occupait la raie brillante du sodium.

Si cette absorption est un fait général, il faut en conclure que les raies noires, observées dans le spectre solaire, indiquent le renversement d'autant de raies brillantes dues aux vapeurs métalliques de son atmosphère. Cette atmosphère joue, pour nous, le rôle du brûleur obscur de Bunsen, et la vive lumière du corps du Soleil celui de la lumière Drummond dans la même expérience.

En étudiant à ce point de vue les raies noires du spectre solaire, Bunsen et Kirchhoff ont pu constater la coïncidence d'un grand nombre d'entre elles avec les raies brillantes de certains métaux. Par exemple, les 70 lignes brillantes du fer, variées de couleur, de largeur et d'intensité, coïncident, sous tous ces points de vue et d'une façon si précise avec 70 raies sombres du Soleil, qu'il est impossible de douter qu'il y ait dans l'atmosphère solaire du fer à l'état de vapeur métallique. Dans la figure 113 (p. 166), on voit un certain nombre de ces raies marquées Fe. Les mêmes savants ont reconnu la présence de dix-neuf autres corps simples, l'hydrogène, le cuivre, le zinc, le chrome, le nickel, le magnésium, le baryum, le calcium, le sodium, le potassium, l'aluminium, le manganèse, le cobalt, le strontium, le cadmium, le titane, le cérium, l'uranium et le plomb.

De l'absence des raies caractéristiques des autres métaux, tels que l'or, l'argent, le platine, etc., dans le spectre solaire, on avait cru d'abord pouvoir conclure que ces corps ne se trouvent pas dans le Soleil, au moins dans les couches extérieures qui forment son atmosphère ; on a fait la même remarque pour les métalloïdes autres que l'hydrogène, tels que l'azote, l'oxygène, le carbone, le soufre, etc. Mais cette conclusion était trop

absolue, ainsi qu'il résulte de nouvelles recherches dues à M. Mitscherlich. Suivant ce physicien, il arrive que la présence de certaines substances dans une flamme a pour effet d'empêcher de se produire les spectres d'autres substances, d'éteindre leurs raies principales : ainsi, quand on imprègne de chlorure de cuivre et d'ammonium la flamme du chlorure de strontium, la raie bleue de ce dernier métal disparaît.

N'est-ce pas chose merveilleuse que cette propriété de la lumière d'accuser avec une sensibilité si grande la composition chimique des corps d'où elle émane, de conserver, après un trajet de 37 millions de lieues, les traces de l'absorption de tel ou tel rayon coloré, indice certain de l'action des corps simples en suspension dans une atmosphère que les astronomes ne faisaient que soupçonner, et dont l'existence se trouve ainsi confirmée?

Parmi les nombreuses raies qu'on observe dans le spectre de la lumière du Soleil, il en est toutefois un certain nombre qui ne sont pas dues à l'absorption de l'atmosphère solaire. M. Janssen a prouvé que l'atmosphère terrestre contribue, pour une part, dans le phénomène, et il a appelé *raies telluriques* celles qui sont dues à cette dernière cause. Dès 1833, Brewster découvrait dans le spectre du Soleil des bandes obscures qui modifiaient l'aspect de certaines régions de ce spectre : ces bandes, visibles au lever et au coucher de l'astre, c'est-à-dire quand l'épaisseur des couches atmosphériques interposées est la plus grande possible, disparaissaient à mesure que l'astre s'élevait à de plus grandes hauteurs au-dessus de l'horizon. De nombreuses expériences faites par M. Janssen ont confirmé celles de Brewster; notre savant compatriote a constaté la présence des raies telluriques dans les spectres d'autres astres, par exemple dans celui de Sirius, et il a prouvé que l'absorption élective de notre atmosphère est due surtout à la vapeur d'eau que l'air renferme, de sorte que l'ensemble de ces raies constitue le spectre de la vapeur d'eau elle-même.

On peut voir, dans la figure 125, quelques-unes des raies en

question situées dans le voisinage de la raie D du spectre. La portion supérieure représente cette région observée quand le Soleil est au méridien. Celle d'en bas est la même région vue quand le Soleil est près de l'horizon, à son lever ou à son cou-

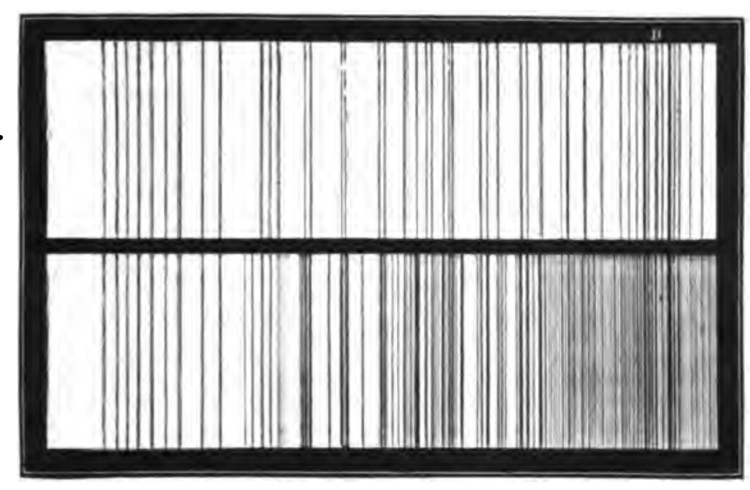


Fig. 125. — Raies telluriques de la région D du spectre solaire, d'après J. Janssen.

cher; une multitude de raies fines sont venues s'ajouter aux premières : ce sont les raies telluriques de cette partie du spectre.

L'analyse spectrale est allée plus loin encore dans l'étude de

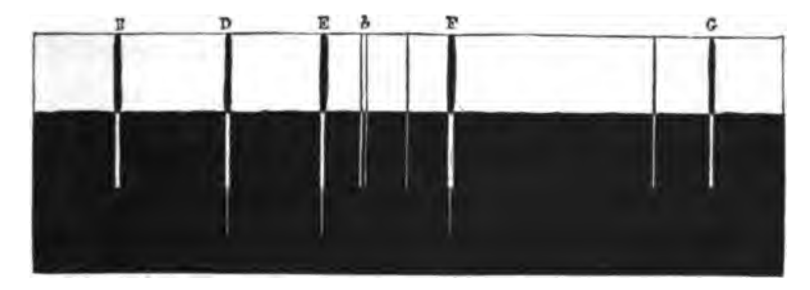


Fig. 126. — Les neuf raies brillantes des protubérances, d'après l'observation faite le 18 août 1868 à Wha-Tonne par M. G. Rayet.

la constitution chimique du Soleil. Elle s'est attaquée à l'atmosphère solaire elle-même, et tout d'abord aux protubérances lumineuses qu'on voit apparaître sur le contour de l'astre pendant le court instant où le disque est masqué par la Lune dans les éclipses totales. Divers observateurs, parmi lesquels nous

citerons deux astronomes anglais, le lieutenant Herschel et le major Tennant, et deux astronomes français, MM. Rayet et Janssen, appliquèrent le spectroscope à ces curieux appendices du contour du Soleil, lors de l'éclipse totale qui eut lieu le 18 août 1868. Ils virent apparaître, dans le spectre des protubérances observées, un certain nombre de lignes brillantes, parmi lesquelles deux correspondaient aux raies C et F du spectre solaire, accusant ainsi l'existence de l'hydrogène. Dans cette même circonstance, M. Janssen imagina une méthode d'observation qui permettait d'explorer le contour du Soleil même en dehors des éclipses totales, et cette méthode perfectionnée a rendu possible en tout temps l'étude des protubérances, l'analyse de leur lumière, l'examen détaillé de toutes les circonstances de leur production, de leurs formes, de leurs hauteurs, des transformations qu'elles subissent. Nous renverrons, pour la description détaillée des phénomènes, aux chapitres de notre ouvrage LE CIEL qui traitent de la constitution du Soleil. Nous ne ferons ici que résumer très rapidement les principaux résultats de cette application inespérée de l'analyse spectrale.

On a reconnu que les protubérances ne sont autre chose que des expansions accidentelles d'une couche de matière qui recouvre le Soleil entier, et qui est principalement constituée par du gaz hydrogène à l'état d'incandescence. C'est à cette couche qu'on donne le nom de *chromosphère*. La lumière qu'elle émet est incomparablement moins intense que celle de la photosphère qui limite le contour visible de l'astre, et c'est cette énorme différence d'intensité qui rendait impossible l'observation habituelle des protubérances, malgré la grande hauteur de quelques-unes d'entre elles. Dans les éclipses totales, la lumière solaire étant complètement masquée par l'interposition du disque obscur de la Lune, les protubérances devenaient visibles, et disparaissaient au contraire dès que la lumière photosphérique se montrait de nouveau. L'emploi du spectroscope, si ingénieusement appliqué par M. Janssen, fit disparaître la difficulté. En effet, le prisme étale la lumière si vive du Soleil en un long

ruban, dont les diverses parties sont d'autant moins lumineuses que la dispersion est plus grande; la lumière des protubérances, au contraire, se réduit en un petit nombre de raies très fines; l'affaiblissement produit par la dispersion est presque nul, et dans les quelques régions très étroites où cette lumière se concentre, l'éclat des raies est comparable à celui des parties correspondantes du spectre solaire.

Si l'hydrogène est l'élément principal de la chromosphère, il est loin d'être le seul. L'exploration spectroscopique des cou-

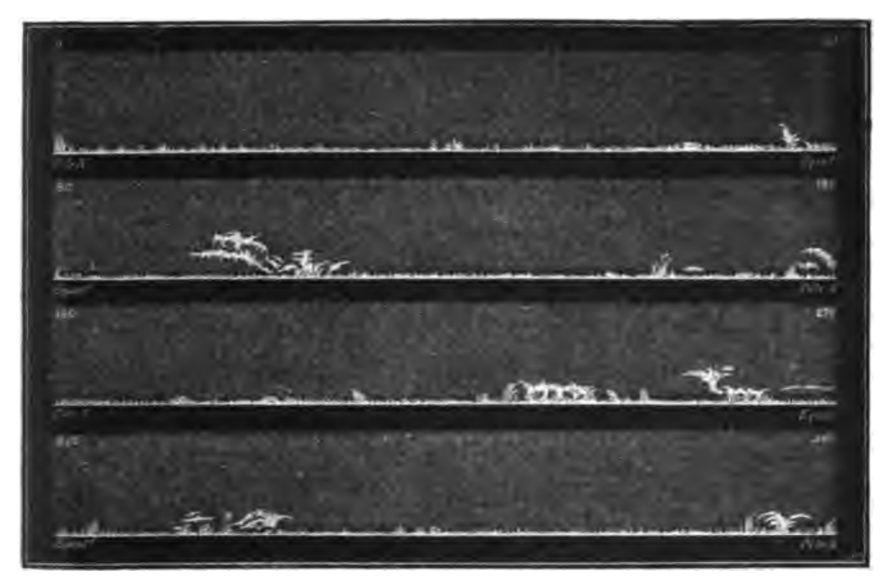


Fig. 127. — Aspect de la chromosphère solaire et des protubérances sur le contour du Soleil.

ches les plus basses de cette enveloppe a permis de reconnaître un nombre croissant de raies brillantes[1] qui ont été identifiées aux raies de plusieurs corps simples, métaux ou métalloïdes. Comme on devait le prévoir, la plupart de ces corps avaient été reconnus déjà dans le spectre solaire. Mais il en est un certain nombre, l'oxygène, l'azote, le soufre, le brome, c'est-à-dire précisément les métalloïdes dont l'absence dans le spectre de

1. M. Young, mettant à profit d'excellentes conditions d'observation, a déterminé jusqu'à deux cent soixante-treize raies dans la lumière chromosphérique.

la photosphère solaire avait été signalée, et qui paraissent exister dans la chromosphère.

Une autre enveloppe beaucoup plus étendue que la chromosphère environne le Soleil à une hauteur qui atteint presque le rayon de l'astre : c'est la *couronne*, sorte d'expansion lumineuse dont les limites extérieures sont assez peu définies et d'ailleurs fort irrégulières, dont l'observation avait été maintes fois signalée pendant la durée des éclipses totales. L'analyse spectrale de la lumière coronale a pu être effectuée pendant la durée de la totalité de quelques éclipses : elle a prouvé que la couronne est un milieu gazeux très rare, en partie formé de gaz hydrogène incandescent, en partie d'une autre substance encore inconnue, caractérisée par une raie verte spéciale (marquée 1474 sur l'échelle spectroscopique de Kirchhoff). Mais la lumière de la couronne renferme aussi des rayons provenant par réflexion de la photosphère et des régions les plus brillantes de la chromosphère.

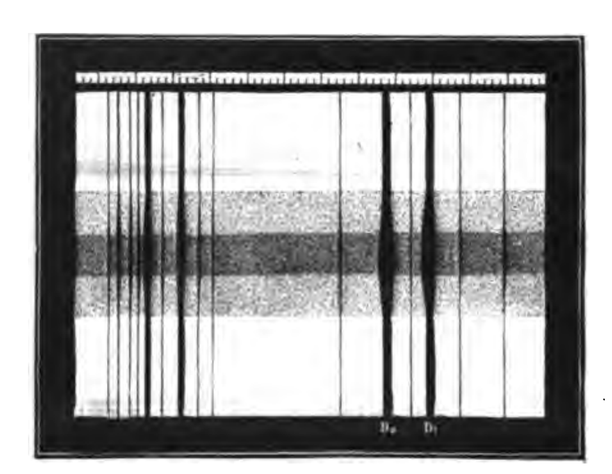


Fig. 128. — Analyse spectrale d'une tache solaire. Élargissement des raies sombres sur le noyau et sur la pénombre.

En examinant les taches du Soleil au spectroscope, on a constaté que les raies sombres y paraissent plus larges et moins nettes ou plus nébuleuses. On peut voir le phénomène dont nous parlons dans la figure 128, qui représente une portion du spectre solaire vu au travers d'une tache; sur la pénombre et le noyau, les raies photosphériques sont très fortement élargies, ce qui s'expliquerait par une absorption plus considérable en ces points, provenant d'une plus grande

épaisseur des couches absorbantes, s'il est vrai que les taches soient des cavités.

Si maintenant nous passons du Soleil à l'étude de la lumière des autres astres, nous allons constater que l'analyse spectrale a enrichi la science de faits nouveaux du plus haut intérêt.

Les planètes ne brillent pas d'une lumière propre; leur éclat est celui de la lumière solaire réfléchie à la surface de chacune d'elles. On pouvait donc prévoir que l'analyse des lumières planétaires donnerait des spectres semblables au spectre solaire, et c'est en effet ce qui a été constaté par les observateurs. Cependant certaines différences indiquent des modifications subies par la lumière solaire, qui ne nous arrive qu'après avoir traversé deux fois l'enveloppe atmosphérique de la planète, quand cette enveloppe existe. Il peut donc y avoir dans l'étude spectroscopique des lumières planétaires de précieuses indications sur l'existence de ces atmosphères, sur la composition chimique ou l'état physique des substances dont elles sont formées. Résumons l'état actuel des connaissances sur ce point.

Commençons par notre satellite. La lumière de la Lune a été analysée par M. Janssen à Rome, MM. Huggins et Miller en Angleterre; mais ces observateurs ont trouvé son spectre identique avec le spectre solaire : aucune bande ou raie nouvelle n'a été reconnue. Les seules différences sont des variations d'intensité selon les régions du disque examinées. Rien n'a indiqué la présence ou l'action absorbante d'une atmosphère, et cela confirme l'opinion depuis longtemps accréditée que notre satellite est privé d'enveloppe gazeuse.

« Lorsqu'on fait, dit M. Huggins, l'observation du spectre d'une étoile un peu avant ou au moment de son occultation par le bord sombre de la Lune, on pourrait espérer de saisir quelques phénomènes caractéristiques du passage de la lumière de l'étoile à travers une atmosphère. S'il existe une atmosphère lunaire qui puisse, soit par les substances dont elle est formée, soit par les vapeurs qu'elle tient en dissolution, exercer une

absorption élective sur la lumière de l'étoile, cette absorption devrait être indiquée par l'apparition dans les spectres de nouvelles raies sombres, immédiatement avant son occultation par la Lune. S'il y a autour de la Lune une atmosphère libre de toute vapeur et sans pouvoir absorbant, mais suffisamment dense, le spectre de l'étoile ne sera pas éteint au même instant sur toute sa longueur. Les rayons violets et bleus subsisteront après la disparition des rayons rouges. J'ai observé avec le plus grand soin la disparition du spectre de l'étoile E des Poissons, lors de son occultation le 4 janvier 1865, dans le but de surveiller ces divers phénomènes, mais je n'ai découvert aucun signe d'atmosphère lunaire. »

« Si de la matière finement divisée, aqueuse ou autre, était présente autour de la Lune, dit encore M. Huggins, les raies rouges de la lumière solaire devraient être un peu moins affaiblies que les raies de réfrangibilité plus élevée. »

D'après les observations télescopiques de Mercure, les astronomes soupçonnaient autour de cette planète une atmosphère très dense. L'analyse spectrale de sa lumière paraît confirmer ces vues. En effet, voici ce que dit M. Vogel à cet égard : « Les raies principales du spectre de Mercure coïncident absolument avec celles du spectre solaire. Il résulte de plus des observations que certaines raies qui ne se produisent dans le spectre du Soleil que lorsque cet astre est très bas sur l'horizon (raies telluriques) et que l'absorption par notre atmosphère est très considérable, se retrouvent *en permanence* dans le spectre de Mercure. On doit donc conclure de là à l'existence d'une enveloppe gazeuse autour de Mercure, exerçant sur les rayons solaires une action absorbante égale à celle de notre atmosphère, lorsqu'elle atteint son maximum. En général, les portions les moins réfrangibles du spectre de Mercure présentent un plus vif éclat que les portions réfrangibles ; mais il est impossible de séparer ici l'effet de notre atmosphère de celui qui est produit par l'atmosphère de la planète. »

L'analyse spectrale n'a rien indiqué de positif à M. W. Huggins sur l'existence d'une atmosphère autour de Vénus. Le P. Secchi paraît avoir été plus heureux : il signale, dans le spectre de sa lumière, l'existence de raies analogues aux raies de la vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre; il en conclut naturellement non seulement la réalité d'une atmosphère, mais l'analogie de composition qu'elle offre avec la nôtre. On sait que les observations astronomiques démontrent que Vénus est en effet enveloppée d'une atmosphère très dense. Or, comme les modifications apportées au spectre solaire sont au contraire très faibles, M. Vogel croit pouvoir en conclure « que les rayons solaires qui nous sont renvoyés par Vénus sont réfléchis pour la plupart à la surface de la couche de nuages qui l'enveloppe, sans presque pénétrer à l'intérieur ».

Mars, nous avons eu déjà l'occasion de le dire, est une planète qui offre des analogies évidentes avec la Terre, au point de vue de sa constitution physique. On a observé à sa surface, outre des taches permanentes, d'autres taches variables et mobiles, qui ont toute l'apparence de masses vaporeuses flottant dans l'atmosphère de la planète. L'analyse spectrale confirme ces probabilités de l'existence d'une atmosphère formée de gaz et de vapeurs. Dans le spectre de la lumière de Mars, en effet, le P. Secchi a vu des lignes semblables à celles de la vapeur d'eau de notre atmosphère. W. Huggins a observé une raie dont la position ne coïncidait avec aucune de celles du spectre solaire, d'où la conséquence qu'elle est due à l'absorption de la planète et probablement à l'atmosphère qui l'entoure; d'autres raies lui ont paru identiques à celles qu'on voit dans la lumière solaire quand elle a traversé les couches les plus basses de notre atmosphère ou des stratus peu élevés, et qui sont dues sans doute à l'absorption par les vapeurs ou les gaz dont ces couches sont formées. Ainsi, Mars possède certainement une atmosphère vaporeuse. Depuis longtemps les astronomes avaient constaté ce fait que les bords du disque sont plus lumineux que les parties centrales de Mars, ce qui laissait présumer l'exis-

tence d'une atmosphère effaçant par son éclat les taches sombres, au moment où la rotation les amène vers les bords.

M. Vogel, dans ses *Études de spectroscopie planétaire*, a confirmé ces résultats. Voici un extrait qui concerne Mars : « Dans le spectre de Mars, dit-il, on retrouve un très grand nombre de raies du spectre solaire. Dans les portions les moins réfrangibles du spectre, apparaissent quelques bandes qui n'appartiennent point au spectre solaire, mais qui coïncident avec celles du spectre d'absorption de notre atmosphère. On peut conclure avec certitude que Mars possède une atmosphère qui, pour la composition, ne diffère pas essentiellement de la nôtre, et doit être riche, en particulier, en vapeur d'eau. La coloration rouge de Mars semble résulter d'une absorption qui s'exerce généralement sur les rayons bleus et violets dans leur ensemble; au moins, il n'a pas été possible de discerner, dans cette portion du spectre, des bandes d'absorption tranchées. »

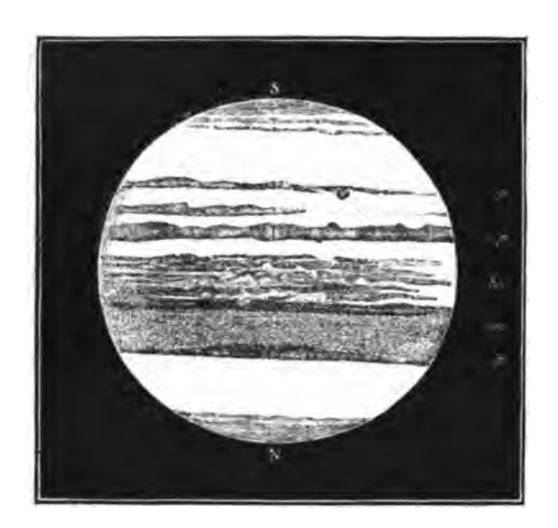


Fig. 129. — Jupiter et ses bandes.

De Mars, franchissons tout l'intervalle qui sépare cette planète de Jupiter, intervalle occupé, comme on sait, par les innombrables planètes télescopiques, et arrivons au globe colossal si reconnaissable à son aplatissement et aux bandes alternativement sombres et lumineuses dont sa surface est sillonnée. L'étude de ces apparences, de leurs variations de forme, de position, de couleur, a conduit à la conclusion que les bandes lumineuses sont des zones de nuages réfléchissant fortement la lumière solaire, tandis que les bandes sombres correspondent

aux éclaircies à travers lesquelles le sol de la planète est visible. Les variations curieuses signalées dans ces accidents paraissent donc dues à des changements atmosphériques.

L'analyse du spectre de la lumière de Jupiter a fourni sur la nature de l'enveloppe gazeuse de la planète quelques données plus positives que celles que donne la seule observation télescopique. Voici en effet ce qu'ont trouvé deux observateurs versés dans ce genre de recherches, MM. Huggins et Miller : « On voit, disent-ils, dans le spectre de Jupiter des raies qui indiquent l'existence autour de cette planète d'une atmosphère absorbante. Une bande foncée correspond à quelques raies atmosphériques terrestres et indique probablement la présence

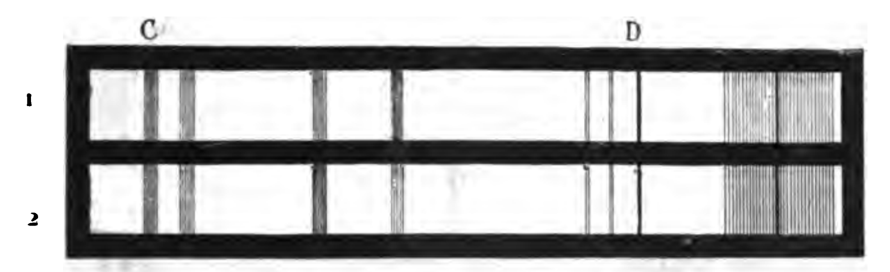


Fig. 130. — Spectre de Jupiter comparé au spectre de la lumière atmosphérique : 1, spectre de Jupiter; 2, de l'atmosphère.

de vapeurs semblables à celles de l'atmosphère de la Terre. Une autre bande n'a pas sa correspondante parmi les raies d'absorption de notre atmosphère, et nous signale la présence de quelque gaz ou vapeur n'existant point dans l'atmosphère terrestre. » D'après M. Vogel, c'est une question de savoir si cette bande obscure (dans le rouge, longueur d'onde 617,9) résulte de la présence d'un corps spécial à l'atmosphère de Jupiter, ou si elle provient du mélange des gaz dont elle est formée selon des proportions différentes de celles de l'air. « Il serait encore possible, dit-il, que la composition des deux atmosphères fût la même, mais que leur action sur les rayons solaires différât seulement, par suite des circonstances de température et de pression, tout autres à la surface de Jupiter de ce qu'elles sont sur notre planète[1]. »

1. Dans une étude que vient de publier M. Faye sur *la Lune et la Terre comparées au*

Le même savant ajoute : « Le spectre des bandes sombres du disque de Jupiter est caractérisé surtout par une absorption uniforme, très marquée, que subissent les rayons bleus et violets. On ne voit point apparaître à ces places-là de nouvelles bandes d'absorption, mais les raies y sont plus marquées et plus larges qu'ailleurs : ce qui prouve nettement que les portions obscures à la surface de Jupiter sont plus profondes que les portions avoisinantes. La lumière solaire pénètre plus profondément, en ces endroits-là, dans l'atmosphère de la planète et y subit une altération plus marquée. Cette remarque vient à

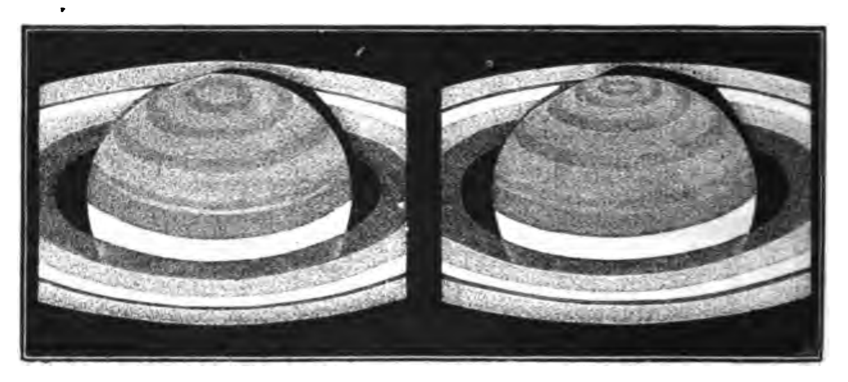


Fig. 131. — Les bandes du globe de Saturne, d'après Bond.

l'appui de l'opinion généralement admise que les bandes brillantes sont des amas opaques de nuages. »

Saturne est, comme Jupiter, un globe aplati aux pôles de rotation, et son disque offre aussi des bandes d'aspect grisâtre parallèles à l'équateur. On est donc porté par analogie à les considérer comme formées par des zones de nuages que la rapidité du mouvement de rotation accumule incessamment de part et d'autre des régions équatoriales de la planète, par un phénomène semblable à celui des alizés terrestres, mais beau-

point de vue géologique, l'éminent astronome rapporte l'opinion de quelques savants qui « pensent que Jupiter pourrait bien être encore à cet état où l'incandescence du corps de la planète serait masquée et protégée longuement par une épaisse atmosphère. Même à l'époque où le noyau de la Terre était encore en pleine fluidité ignée, elle ne brillait pas au dehors. Sa limite visible, mais non lumineuse, a dû se trouver transportée aux confins de son atmosphère, là où la vapeur allait se condenser en nuages. »

coup plus régulier et permanent. Seulement, Saturne est à une telle distance de la Terre qu'il n'est plus possible de distinguer aucun détail sur son disque, et que l'existence d'une atmosphère vaporeuse autour de la planète restait à l'état d'hypothèse. Heureusement, l'analyse spectrale a permis de compléter à cet égard les éléments fournis par l'investigation télescopique. Voici ce qu'elle a donné jusqu'à présent :

D'après M. W. Huggins, le spectre de Saturne est faible, mais on y découvre quelques raies semblables à celles qui distinguent le spectre de Jupiter. Ces raies sont moins fortement indiquées dans la lumière des anses des anneaux et nous montrent ainsi que le pouvoir absorbant de l'atmosphère autour des anneaux est plus faible que celui de l'atmosphère entourant le globe de la planète. Un savant français, M. Janssen, a trouvé tout récemment que plusieurs des raies atmosphériques sont produites par la vapeur d'eau. Il est vraisemblable que cette vapeur aqueuse existe dans les atmosphères de Jupiter et de Saturne. Le P. Secchi a constaté une pareille analogie entre les spectres lumineux des deux planètes; de plus, il a observé dans celui de Saturne des raies qui ne coïncident avec aucune des raies telluriques produites par l'absorption de notre atmosphère. L'atmosphère de Saturne contient donc sans doute des gaz qui n'existent pas dans la nôtre.

De son côté, M. Vogel caractérise en ces termes le spectre de Saturne : « On a pu, dit-il, reconnaître les raies les plus marquées du spectre solaire. Quelques bandes, surtout dans le rouge et l'orangé, n'ont pas leur équivalent dans le spectre solaire ; mais elles coïncident avec des groupes de raies du spectre de notre atmosphère, à l'exception toutefois d'une bande très intense (longueur d'onde moyenne 618,2). Les rayons bleus et violets subissent une absorption uniforme dans leur passage à travers l'atmosphère de Saturne; cette absorption est surtout très marquée dans la zone équatoriale obscure. Le spectre de Saturne présente donc la plus grande analogie avec celui de Jupiter. Il n'en est pas de même du spectre de

l'anneau de Saturne. La bande caractéristique dans le rouge ne s'y trouve pas, ou du moins elle n'y est marquée que par une faible trace. On pourrait conclure de là que l'anneau n'a pas d'atmosphère, ou du moins n'est entouré que d'une couche gazeuse de densité et d'épaisseur très faibles. »

Le spectre d'Uranus a été étudié par Secchi, Huggins et Vogel. Son faible éclat ne permet point d'y distinguer les raies de Frauenhofer, mais plusieurs bandes obscures y ont été reconnues, dont l'une paraît coïncider avec la raie F de l'hydrogène. D'après Vogel, « il est hors de doute que les bandes observées dans le spectre d'Uranus résultent de l'absorption des rayons solaires dans une atmosphère enveloppant cette planète. Il n'est pas possible, dans l'état actuel de la science,

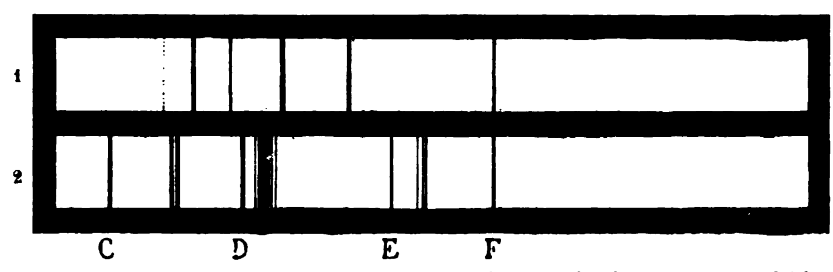


Fig. 132. — 1, spectre d'Uranus, d'après W. Huggins; 2, raies du spectre atmosphérique.

de déterminer quels sont les corps qui produisent cette absorption. Nous remarquerons seulement qu'une des bandes du spectre d'Uranus coïncide exactement avec une des bandes de Jupiter et de Saturne (plus haut signalée). »

Enfin, selon le même observateur, le spectre de Neptune, où l'on ne peut distinguer non plus les raies de Frauenhofer, et qui est caractérisé par la présence de quelques larges bandes obscures, aurait une grande analogie avec celui d'Uranus.

On voit, par les résultats de ces recherches délicates et difficiles, que si la lumière des planètes analysée au spectroscope conserve les caractères principaux qui dénotent son origine solaire, elle se trouve néanmoins avoir subi des modifications importantes. Diverses régions du spectre, ou, si l'on veut, divers rayons de la lumière primitive, ont été absorbés par leur

double passage dans les milieux gazeux qui constituent les atmosphères planétaires. On retrouve l'influence de la vapeur d'eau dans plusieurs d'entre elles ; mais il semble dès maintenant probable que d'autres éléments déterminent des absorptions spéciales, et qu'ainsi les atmosphères ne sont pas partout composées des mêmes substances.

Sans sortir du système solaire, nous avons encore à interroger l'analyse spectrale sur la constitution de certains corps qui diffèrent assurément des planètes par leur aspect, leur forme, leur origine, au moins autant que par leurs autres caractères astronomiques. Nous voulons parler des comètes, des étoiles filantes et des bolides.

En étudiant les lumières cométaires à l'aide d'instruments d'optique que nous décrirons plus loin, on est arrivé à cette conclusion que les comètes sont des corps qui réfléchissent, il est vrai, une faible partie de la lumière que le Soleil envoie à leur surface, mais qui brillent aussi d'un éclat qui leur est propre. L'opinion générale est que leurs noyaux sont incandescents. Nous allons voir l'analyse spectrale confirmer cette manière de voir.

En effet, il y a d'abord un fait commun à toutes les comètes dont la lumière a été analysée. Ce fait, c'est que leur spectre consiste principalement en un certain nombre de bandes lumineuses brillantes, séparées par d'assez larges intervalles obscurs. Le spectre continu, d'ailleurs très faible, sur lequel se projetaient ces bandes, n'existait ou du moins n'était visible que pour quelques-unes d'entre elles; les comètes dont le noyau était très faible, comme celui de la comète d'Encke, ou n'était pas encore assez lumineux (Comète 1873 IV), n'ont pas donné de spectre continu. Il semble donc acquis que les bandes brillantes sont produites par la lumière des atmosphères ou des chevelures cométaires. En conséquence, les comètes à noyau, dont la lumière a pu être analysée par le prisme, seraient ainsi constituées :

Au centre de la nébulosité un noyau donnant un spectre

continu. Cela indique-t-il nécessairement une matière liquide ou solide incandescente? On pourrait l'affirmer, si la continuité de ce spectre pouvait être regardée comme entière; mais sa faiblesse est telle, qu'il est difficile de dire si la lumière dont il brille est une lumière propre due à l'incandescence de la matière qui compose le noyau, ou si elle est la lumière réfléchie du Soleil. Peut-être participe-t-elle de ces deux origines, surtout quand la comète, en s'approchant du Soleil, acquiert une température croissante; les observations de polarisation par réflexion prouvent en tout cas qu'une partie au moins de cette lumière est réfléchie du Soleil.



Fig. 133. — Comète de Winnecke (1868 II).

Quant à la lumière des atmosphères et des queues, le spectre à branches brillantes dénote, dans la matière qui les forme, à la fois l'état gazeux et l'incandescence. Comme, d'autre part, les phénomènes des aigrettes émanées du noyau prouvent que les enveloppes atmosphériques se forment aux dépens de ce dernier, il semble bien difficile d'admettre l'incandescence pour l'atmosphère cométaire et pour les queues, si le noyau lui-même dont elles se forment incessamment ne jouit pas de cet état d'incandescence. Donc il n'est pas douteux que les noyaux cométaires, tout au moins dans le voisinage du périhélie, émettent, outre la lumière réfléchie du Soleil, de la lumière directe, émanée de leur propre substance.

Au point de vue chimique, les comètes, en petit nombre il est vrai, qui ont été analysées, ont une constitution très peu complexe. C'est, ou du carbone simple, ou un composé du carbone, hydrogène carboné d'après les comparaisons faites par

M. Huggins, oxyde de carbone ou acide carbonique d'après les recherches du P. Secchi. Ce dernier savant a donc eu raison

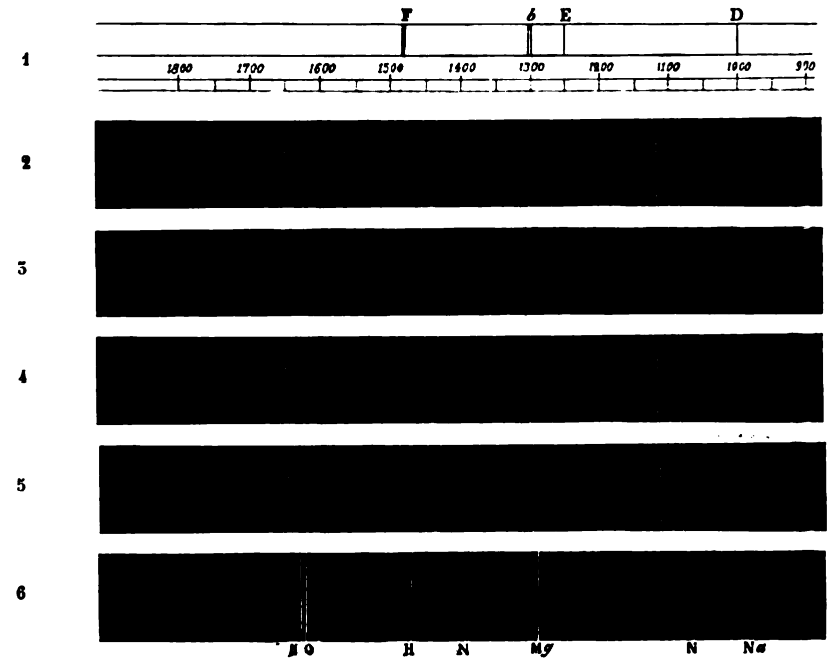


Fig. 134. — Spectres des comètes de 1868 I et de 1868 II. — 1, spectre solaire; 2, spectre du carbone; 3, spectre du gaz oléfiant; 4, spectre de la comète de Winnecke; 5, spectre de la comète de Brorsen; 6, spectre de l'étincelle d'induction.

de dire : « Il est très remarquable que toutes les comètes observées jusqu'ici ont les bandes du carbone. »



Fig. 135. — Spectre de la comète 1873 IV (Henry) : 1° le 26 août, 2° le 29 août.

Entre les comètes et les étoiles filantes, il semble aujourd'hui démontré qu'il existe un lien d'origine. Ces derniers corpus-

cules sont les débris de comètes disloquées; les essaims ou apparitions périodiques ne sont autre chose que des fragments de comètes qui, en traversant le système solaire, ont subi les perturbations des masses des planètes et se sont divisées. Si ces vues nouvelles sont conformes à la réalité, les étoiles filantes doivent avoir la même constitution physique que les comètes.

Mais comme les étoiles filantes n'apparaissent que dans les plus hautes régions de l'atmosphère, qu'elles s'éteignent et sans doute s'évaporent bien avant d'arriver jusqu'au sol, une seule méthode, l'analyse spectrale, pourrait nous renseigner sur leur état physique et chimique, du moins au moment de leur combustion. En étudiant de cette façon la lumière des étoiles filantes des 9 et 10 août 1866, A. Herschel a trouvé que les traînées et quelques noyaux d'étoiles étaient formés d'une substance gazeuse en ignition, renfermant notamment de la vapeur de sodium. La présence du sodium dans l'atmosphère à cette hauteur n'étant pas probable, A. Herschel en conclut que ce corps simple appartenait bien aux étoiles filantes analysées. D'autres spectres ont indiqué pour la constitution des météores des agglomérations de parcelles solides incandescentes. En novembre 1868, le P. Secchi a analysé la lumière d'une étoile très vive, dont la traînée était restée visible pendant un quart d'heure ; son spectre, formé de raies et de bandes brillantes, rouges, jaunes, vertes, bleues, indiquait un gaz lumineux. M. Konkoly a étudié au spectroscope, en juillet et en août 1872, les traînées de trois météores ; leurs spectres renfermaient toutes les raies du sodium et l'un d'eux avait en outre une ligne du magnésium. Un brillant météore du 13 octobre 1873, analysé par le même observateur, outre des raies du magnésium et du sodium, avait quatre lignes communes avec le spectre d'un carbure d'hydrogène (*coal-gas*). Enfin, en 1874, M. Arcimis a observé, à Cadix, 50 étoiles du groupe des Perséides; 27 avaient un spectre continu où le violet faisait généralement défaut ; presque toutes avaient la raie du sodium. En rapprochant ces résultats de ceux qu'a donnés l'analyse des spectres

de la lumière des comètes, on voit que la constitution chimique de ces derniers corps n'est pas précisément identique avec celle des étoiles filantes; le carbone a bien été reconnu dans un des météores, mais les autres renferment le sodium, dont l'existence dans les spectres cométaires n'a pas encore été signalée. A la vérité, l'incandescence gazeuse caractérise la lumière des comètes et celle des étoiles filantes; toutefois cette incandescence ne paraît exister pour celles-ci qu'après leur pénétration dans l'atmosphère, et, contrairement à l'opinion du savant A. Herschel, nous inclinons à croire que c'est là que se trouve le sodium reconnu par l'analyse spectroscopique.

Nous terminerons ici ce que nous avons à dire de l'analyse spectrale appliquée à l'astronomie des corps du monde solaire, en rapportant quelques observations récentes faites sur la lumière zodiacale. Un savant Américain, M. Wright, a tiré de ses observations, faites en 1874, les conclusions suivantes : La lumière zodiacale est celle du Soleil réfléchie par une matière solide. Il trouva en effet, pour cette lumière, « un spectre continu, ne différant pas sensiblement (sauf en ce qui concerne l'intensité) du spectre solaire, dépourvu en tout cas de toute ligne ou bande brillante analogue à celle de l'aurore boréale. » Le résultat important de la continuité du spectre de la lumière zodiacale avait été obtenu antérieurement par M. P. Smyth, puis par M. Liais, qui croyait cependant à la possibilité de l'existence de faibles lignes noires. Mais il faut dire que d'autres observations contredisent complètement celles que nous venons de rapporter. M. Respighi, en janvier et février 1872, ayant analysé la lumière zodiacale à l'aide d'un spectroscope à vision directe, « trouva bien marquée la raie connue d'Angstrom dans le vert, » raie qu'il observa à la même époque dans le spectre d'une aurole boréale. « Ce fait, dit M. Respighi, que confirme une observation semblable, faite par Angstrom en mars 1867, me semble assez important, car il tendrait à montrer l'identité de la lumière de l'aurore boréale avec la lumière zodiacale, et par suite la probabilité de l'identité de leur origine. » Enfin

M. Tacchini, en rapportant les observations de M. Wright, rappelle qu'en avril 1872 il analysa, avec M. P. Smyth, la lumière zodiacale, qu'il lui trouva un spectre continu, mais que néanmoins il y avait une zone vive nettement limitée, qui se fondait latéralement, ce qu'on n'obtient jamais d'une faible lumière solaire. Le savant astronome de Palerme croit pouvoir en conclure que « la lumière zodiacale n'est pas seulement la lumière solaire réfléchie par des corpuscules météoriques ; outre les particules solides capables de donner, par réflexion, le spectre et la polarisation observées par M. Wright, la masse lenticulaire peut renfermer quelque substance maintenue par la chaleur solaire dans un état physique tel, qu'il en résulte un spectre particulier analogue au spectre des comètes ou de l'atmosphère coronale. »

§ 2. L'ANALYSE SPECTRALE APPLIQUÉE A L'ÉTUDE DES ÉTOILES ET DES NÉBULEUSES.

Si la loi universelle de la gravitation est un témoignage de l'unité du principe qui régit les mouvements de la matière, agglomérée sous la forme de corps célestes, aussi bien dans les limites de notre monde solaire que dans les régions extérieures du monde sidéral, elle ne nous apprend rien sur l'intime constitution de ces corps, sur la nature physique et chimique des substances dont ils sont formés.

Il a fallu la découverte des propriétés de la lumière qui ont été exposées dans les chapitres précédents, il a fallu l'invention d'une méthode aussi délicate et aussi précise que l'analyse spectrale, pour arriver à pénétrer le secret de cette composition. Les résultats de l'application de cette méthode à l'astronomie solaire et planétaire sont déjà, comme on vient de le voir, assez nombreux et assez positifs, pour qu'on puisse considérer comme extrêmement probable l'unité de composition chimique du Soleil et des planètes. Au sein de l'immense masse

incandescente, du foyer d'où se sont détachés à l'origine, comme autant d'enfants d'un même père, les embryons de ces globes aujourd'hui éteints, l'analyse spectrale a reconnu l'existence des mêmes corps simples, métaux et métalloïdes, dont les combinaisons variées forment la masse de notre Terre, ainsi que son enveloppe gazeuse : le Soleil est chimiquement formé comme l'est une des huit planètes principales. Peut-être renferme-t-il quelques éléments qui nous sont inconnus; peut-être aussi quelques-uns des éléments terrestres ne se trouvent pas dans le Soleil. La température excessive à laquelle les corps y sont soumis, et qui est telle qu'aucune des combinaisons connues à la surface de la Terre ne peut subsister dans la photosphère et la chromosphère du Soleil, ne permet point d'insister sur des différences qui peut-être ne sont pas réelles, et la conclusion générale de l'identité des matériaux du Soleil, de la Terre et par analogie des autres planètes, ne paraît pas devoir être infirmée par ces exceptions à la règle.

Nous allons maintenant aborder la même question, en quittant le monde solaire et planétaire, pour étudier, au même point de vue, l'Univers sidéral, c'est-à-dire les étoiles et les nébuleuses. Avant que le spectroscope ne fût appliqué aux lumières stellaires, les astronomes avaient établi comme un fait hors de contestation que les étoiles ne sont pas des corps brillant d'une lumière empruntée, réfléchie : ce sont, comme le Soleil, des astres lumineux par eux-mêmes, des sources primitives de lumière, probablement des masses incandescentes. C'est ce que l'analyse spectrale va confirmer, en y ajoutant de précieuses données sur la constitution physique et chimique des étoiles.

Nous avons vu que Frauenhofer, après avoir découvert les innombrables raies sombres dont le spectre de la lumière solaire est sillonné, eut le premier l'idée d'étudier au même point de vue les spectres de la lumière des étoiles. Il trouva dans les spectres de Sirius, de Castor, de Pollux, de la Chèvre,

de Betelgeuze et de Procyon, un certain nombre de raies noires diversement placées relativement aux couleurs et aux raies du spectre solaire; mais il put reconnaître, dans les quatre dernières étoiles, l'identité de position d'une ou deux raies, et notamment de la raie D, placée, comme on sait, au milieu du jaune du spectre solaire. Frauenhofer publia ces résultats en 1823. Trente-sept ans plus tard, en 1860, l'astronome Donati étendit la même étude à un plus grand nombre d'étoiles, en choisissant toujours, à cause de leur plus grande intensité lumineuse, les étoiles de première grandeur. Pour concentrer sur la fente du spectroscope la plus grande quantité possible de lumière émanant de l'étoile observée, Donati se servit d'une lentille de grandes dimensions (de 41 centimètres de diamètre et de $1^m,58$ de distance focale). Il put ainsi fixer relativement aux lignes du spectre solaire les positions exactes des raies de 13 étoiles, savoir : Sirius (3 raies), Wéga (3 raies), Procyon (3 raies), Régulus (2 raies), Fomalhaut (1 raie), Castor (2 raies), Ataïr (2 raies), la Chèvre (3 raies), Arcturus (2 raies), Pollux (2 raies), Aldébaran (2 raies), Betelgeuze (3 raies) et Antarès (2 raies).

Tout ce qu'on pouvait conclure de ces premiers résultats, c'est que les lumières des étoiles étudiées avaient entre elles et avec la lumière du Soleil une certaine analogie, c'est qu'elles étaient des sources lumineuses de même ordre. Mais ces conséquences prirent tout à coup une importance extrême, quand la méthode d'analyse spectrale fut découverte par Kirchhoff et Bunsen, et que ces savants l'eurent appliquée à la constitution physique et chimique du Soleil. On put alors, en comparant les positions des raies des spectres stellaires aux raies brillantes des spectres des gaz et des métaux, étendre aux étoiles les conclusions déjà obtenues pour le Soleil, et connaître dans une certaine mesure la constitution physique et chimique de corps célestes dont la lumière met des années pour venir jusqu'à nous. Huggins et Miller en Angleterre, Secchi à Rome, Janssen, Wolf et Rayet à Paris, Zollner en Allemagne, sont les noms des

savants à qui l'on doit, dans cet ordre de recherches, les découvertes les plus intéressantes, dont nous allons donner un résumé rapide.

Aldébaran. D'après MM. Huggins et Miller[1], la lumière d'un rouge pâle d'Aldébaran, analysée au spectroscope, présente de nombreuses et fortes lignes, particulièrement dans l'orangé, le vert et le bleu. Les positions mesurées de 70 de ces raies ont montré leurs coïncidences avec les raies brillantes de neuf éléments chimiques, à savoir : le sodium, le magnésium, l'hydrogène, le calcium, le fer, le bismuth, le tellure, l'antimoine et le mercure. Les lignes de l'azote, du cobalt, de l'étain, du plomb, du cadmium, du baryum et du lithium n'ont fourni aucune coïncidence avec les raies de l'étoile.

Betelgeuze (α Orion), étoile dont la lumière de teinte orangée a un spectre extrêmement complexe et remarquable. De forts groupes de lignes se voient dans le rouge, le vert et le bleu. En outre, sept bandes sombres paraissant formées de lignes très fines sont réparties entre diverses régions du spectre, du rouge au bleu. Comme dans Aldébaran, les raies citées plus haut du sodium, du magnésium, du calcium, du fer et du bismuth se trouvent dans ce spectre ; mais, circonstance caractéristique, les raies de l'hydrogène sont absentes.

β *Pégase*. Le spectre de cette étoile a beaucoup d'analogie avec celui de α Orion : même disposition des groupes de lignes et des bandes sombres, et aussi même absence de l'hydrogène. La présence du sodium, du magnésium et probablement du baryum a été constatée. Le Soleil et le plus grand nombre des étoiles analysées jusqu'ici ont dans leurs spectres les raies C et F de l'hydrogène ; l'absence des raies, et par conséquent de la substance elle-même, dans les atmosphères de α Orion et β Pégase, mérite donc d'être remarquée.

Sirius (α Grand Chien). Le spectre de cette brillante étoile est fort intense ; mais, dans nos climats, le peu de hauteur de

1. *On the spectra of some of the Fixed Stars*, mai 1874.

l'astre rend difficile l'observation des raies les plus fines. La double ligne D du sodium, les trois raies *b* du magnésium, C et F de l'hydrogène coïncident avec les principales lignes du spectre de Sirius, qui paraît aussi renfermer du fer.

Wéga (α Lyre) a un spectre pareil à celui de Sirius, et cette étoile a les mêmes éléments, sodium, magnésium et hydrogène.

La Chèvre. Le spectre de cette étoile blanche est tout à fait semblable à celui de notre Soleil. Les raies y sont très nombreuses; et parmi celles que MM. Huggins et Miller ont mesurées, se trouve la double ligne D du sodium.

Le spectre de *Pollux*, riche en raies, accuse l'existence du sodium, du magnésium et probablement du fer. Enfin la double raie du sodium se trouve aussi dans le spectre d'*Arcturus*, qui a quelque ressemblance avec le spectre solaire.

Le P. Secchi, qui a étudié les spectres de plus de trois cents étoiles de diverses grandeurs, range les étoiles en trois ou plutôt quatre classes principales :

La première classe comprend les étoiles blanches ou mieux azurées, et a pour type Sirius; telles sont aussi Wéga, Ataïr, Régulus, Rigel, les étoiles de la Grande Ourse (α excepté), celles d'Ophiucus, etc. Le spectre de leur lumière est traversé par quatre fortes raies sombres situées, l'une dans le rouge, la seconde dans le bleu à la limite du vert (raie F du spectre solaire), la troisième dans le violet (voisine de H); la quatrième, dans l'extrême violet, est visible dans le spectre des plus brillantes étoiles. Ce sont les quatre raies les plus brillantes de l'hydrogène. D'après Secchi, la moitié à peu près des étoiles du ciel se rapportent à ce type.

La seconde classe renferme les étoiles à lumière jaune, et a pour types principaux Arcturus, Pollux, la Chèvre, α Grande Ourse, Procyon; la plupart des belles étoiles de seconde grandeur en font partie. Leurs spectres sont, comme le spectre solaire, sillonnés de raies fines et nettes. Dans Arcturus, trente raies, choisies parmi les principales, coïncident avec des raies solaires. Cette classe contient le tiers des étoiles du ciel.

Les étoiles rouges, comme Betelgeuze, Antarès, Algol, α Hercule, β Pégase, composent la troisième classe, et ont généralement un spectre formé de larges zones brillantes, au nombre de six ou sept, séparées par des intervalles nébuleux, semi-obscurs : on a vu plus haut la description, d'après Huggins et Miller, des spectres de deux de ces étoiles. L'aspect de ces spectres est celui de cannelures (fig. 136, 4) ou d'une série de colonnes éclairées par côté. Les étoiles de cette classe, moins nombreuses que celles des deux autres, se confondent quelquefois avec la seconde. Ainsi Aldébaran participe à la

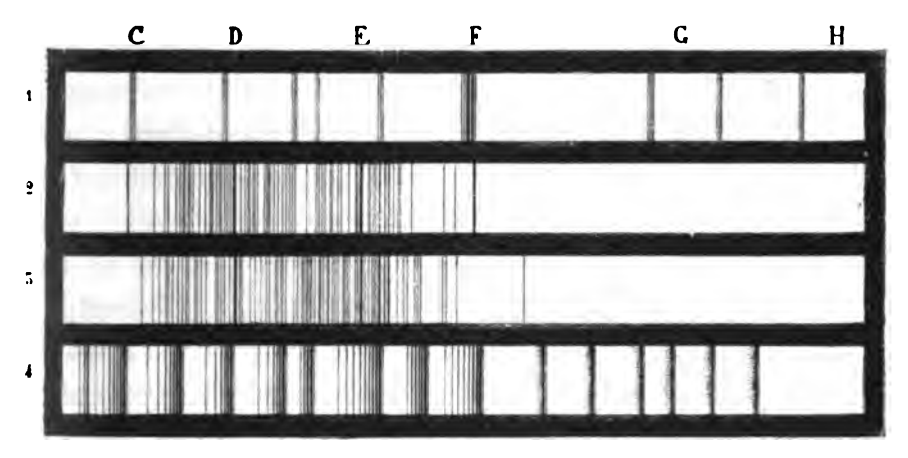


Fig. 136. — Spectres stellaires : 1, Sirius ; 2, Aldébaran ; 3, α Orion ; 4, α Hercule.

fois de la seconde et de la troisième classe. Ce troisième type comprend, d'après Secchi, des étoiles qui sont toutes variables, et dont la couleur tire plus ou moins sur le rouge ou l'orangé.

La quatrième classe comprend un petit nombre de petites étoiles de couleur rouge-sang, dont le spectre ne diffère de celui de la troisième que par le plus petit nombre des zones claires, et par cette particularité « que la lumière des zones commence brusquement du côté du violet et va en s'affaiblissant insensiblement du côté du rouge, tandis que, dans les spectres du troisième type, les mêmes circonstances se présentent dans le sens inverse ».

L'absence d'hydrogène dans les étoiles de la troisième classe

et la composition chimique des unes et des autres, a suggéré à M. Huggins les observations suivantes : « Je me hasarde à à peine, dit-il, à émettre l'idée que les planètes qui peuvent circuler autour de ces soleils leur ressemblent très probablement, et, comme elles, ne possèdent point cet élément d'une si haute importance, l'hydrogène. A quelles formes de la vie de semblables planètes peuvent-elles convenir? Mondes sans eau! il faudrait la puissante imagination de Dante pour arriver à peupler de telles planètes de créatures vivantes. A part ces exceptions, il est digne d'observer que ceux des éléments terrestres le plus largement répandus dans la vaste armée des étoiles, sont précisément les éléments essentiels à la vie, telle qu'elle existe sur la Terre : l'hydrogène, le sodium, le magnésium et le fer. L'hydrogène, le sodium et le magnésium représentent en outre l'Océan, qui est une partie essentielle d'un monde constitué comme l'est la Terre. »

L'explication des couleurs variées qui caractérisent les lumières stellaires, doit se rattacher, selon Huggins, à la composition de leur spectre. Au moment de son émission, la lumière serait blanche pour toutes les étoiles ; mais, avant de se répandre dans l'espace, elle doit traverser les atmosphères très diversement composées de chacun de ces soleils. C'est ce trajet qui détermine l'absorption de tels ou tels rayons, selon la nature chimique des vapeurs des atmosphères solaires, et produit pour nous les raies sombres de chaque spectre. Comme ces raies sont plus ou moins intenses et plus ou moins nombreuses dans les diverses régions du spectre, il en résulte, pour la couleur de ces régions, une diminution d'intensité qui laisse la prédominance aux autres couleurs, moins absorbées. Les étoiles blanches seraient celles où les raies se trouvent à peu près également disséminées dans toute la longueur du spectre : telle est Sirius. Les étoiles rouges ou orangées sont celles qui ont des raies nombreuses dans le vert et le bleu : telles sont α Orion et β Pégase.

Une étude comparative des spectres des composantes d'étoiles

doubles a permis également à Huggins de constater que la couleur bleue de la plus petite étoile, de l'étoile satellite, est réelle et non pas produite par un effet de contraste. Il prend pour exemple les composantes de l'étoile double α d'Hercule. Le spectre de la principale est remarquable par des groupes intenses de raies sombres dans le vert, le bleu et le violet : le jaune, l'orangé et le rouge n'ont que quelques faibles raies; ainsi, la disposition des bandes d'absorption s'accorde avec la couleur de cette étoile où l'orangé prédomine. La lumière du satellite est, au contraire, bleu-verdâtre. Or son spectre est sillonné de plusieurs groupes de lignes dans le rouge et dans l'orangé, tandis que la région la plus réfrangible est rendue

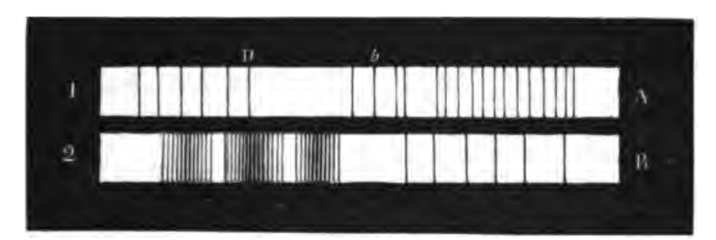


Fig. 137. — Spectres des deux composantes de l'étoile double β du Cygne : A, étoile principale, couleur orangée; B, satellite de couleur bleue.

très brillante par l'absence de fortes raies. Une analyse semblable, faite sur les composantes de β du Cygne, l'une orangée, l'autre bleue, ont conduit M. Huggins aux mêmes conclusions.

L'analyse spectrale de la lumière des étoiles variables ou temporaires ne donne pas de moins intéressants résultats que celle qui a pour objet les étoiles simples ou doubles à lumière constante. On a vu plus haut que, d'après Secchi, les étoiles dont le spectre appartient au troisième type, sont généralement variables. Mais il était important de comparer l'état de leurs lumières aux diverses phases de leurs périodes. Considérons avec cet astronome deux des plus célèbres, Algol à période courte et régulière, et ο ou Mira de la Baleine, étoile variable à longues périodes.

« Algol, examinée plusieurs fois, à l'époque de son minimum d'éclat, a toujours montré (comme dans son maximum) le même type de α de la Lyre. » La conclusion à tirer de cette constance dans le spectre de l'étoile, c'est, selon Secchi, que la variation n'est pas due à un changement réel dans la constitution de l'étoile, parce que le spectre varierait avec des changements dans la température. L'astronome romain l'attribue aux éclipses d'un corps opaque faisant sa révolution autour de l'étoile en 2 jours 21 heures. « Cette idée, dit M. Delaunay, déjà émise antérieurement, s'accorde d'ailleurs très bien avec la régularité du phénomène et avec le peu de durée de la phase de diminution (un peu moins de 7 heures) relativement à la durée totale d'une période. »

Il n'en est pas ainsi de Mira. Son spectre est du troisième type, à cannelures cylindriques parfaitement tranchées, avec les mêmes raies noires que dans celui de l'étoile type α Hercule. « Mais au fur et à mesure, dit Secchi, que l'étoile gagne en éclat, les raies noires du jaune et les premières du vert paraissent diminuer de netteté et devenir moins noires. Ce fait est très intéressant : il indiquerait ici une source de variabilité différente de celle d'Algol. » Le même savant signale comme remarquable le fait que les étoiles variables à période irrégulière (comme α Orion, α Hercule, Mira, etc.) sont des étoiles du même type, à zones multiples. « Cette constitution spectrale, dit-il, indiquant de vastes atmosphères absorbantes, conduit à penser que leur variabilité vient probablement de crises que subit l'atmosphère dont elles sont environnées. »

Nous allons voir de telles crises se manifester dans les étoiles nouvelles ou temporaires, sur une échelle beaucoup plus vaste, mais avec l'absence de toute périodicité régulière.

La récente apparition de l'étoile nouvelle de la Couronne boréale (en mai 1866) a été l'occasion heureuse de ces découvertes. Citons les observateurs eux-mêmes, MM. Huggins et Miller : « Le spectre de l'étoile variable de la Couronne se montre formé de deux spectres superposés, le premier formé

de quatre raies brillantes, le second analogue au spectre du Soleil, chacun d'eux résultant de la décomposition d'un faisceau lumineux indépendant de la lumière qui donne naissance à l'autre. Le spectre continu sillonné de groupes de raies obscures indique la présence d'une phostosphère de matière incandescente, presque certainement solide ou liquide, entourée d'une atmosphère de vapeurs plus froides, qui font naître par absorption les groupes des raies sombres. Jusqu'ici la constitution de cet astre est analogue à celle du Soleil ; mais il offre un spectre additionnel formé de raies brillantes. Il y a donc là une seconde source de lumière spéciale, et cette source doit être un *gaz lumineux*. En outre, les deux principales raies brillantes de ce spectre nous apprennent que ce gaz était composé surtout d'hydrogène, et leur grand éclat prouve que la température du gaz lumineux a été plus élevée que celle de la photosphère. Ces faits, rapprochés de la soudaineté de l'explosion de lumière dans l'étoile, de sa diminution d'éclat immédiate et si rapide, de sa chute, en douze jours, de la seconde à la huitième grandeur, nous conduisent à admettre que l'astre s'est trouvé subitement enveloppé des flammes de l'hydrogène en combustion. Il se pourrait qu'il eût été le siège de quelque grande convulsion, avec dégagement énorme de gaz mis en liberté. Une grande partie de ce gaz était de l'hydrogène, qui brûlait à la surface de l'étoile en se combinant avec quelque autre élément. Ce gaz enflammé émettait la lumière caractérisée par le spectre des raies brillantes. Le spectre de l'autre portion de la lumière stellaire pouvait indiquer que cette terrible déflagration gazeuse avait surchauffé et rendu plus vivement incandescente la matière solide de la photosphère. Lorsque l'hydrogène libre eut été épuisé, la flamme s'abattit graduellement, la photosphère devint moins lumineuse, et l'étoile revint à son premier état. » — « Nous ne devons pas oublier, ajoute W. Huggins, que la lumière, messager cependant si rapide, exige un certain temps pour venir de l'étoile à nous. Cette grande convulsion physique, nouvelle pour nous, était donc

déjà un évènement passé relativement à l'étoile elle-même. En 1866, elle était depuis des années déjà dans les conditions nouvelles que lui a faites cette violente catastrophe ! »

Cette dernière remarque, nous l'avons dit plus haut, s'applique à tous les phénomènes célestes du monde sidéral. Les rayons de lumière qui émanent des étoiles nous arrivent, à chaque instant, après avoir accompli des voyages dont la durée se compte par années, et probablement par siècles.

Sans doute, les étoiles nouvelles de 1672, de 1504, l'étoile temporaire et si extraordinairement variable η du Navire sont des soleils qui, comme l'étoile de la Couronne, ont été le théâtre d'immenses conflagrations, où l'hydrogène a pu jouer un rôle important.

C'est aussi très probablement le cas de la nouvelle étoile qui a fait son apparition dans le Cygne vers la fin de 1876. Vue à Athènes pour la première fois par M. Schmidt, le 24 novembre (près de l'étoile ζ de la même constellation), l'étoile nouvelle, très jaune, était alors de la troisième grandeur, plus intense



Fig. 158. — Spectre de l'étoile nouvelle apparue en 1876 dans la constellation du Cygne.

que η Pégase. M. Paul Henry l'a observée à Paris vers la fin de novembre. Elle lui a paru de 5e grandeur et de couleur verdâtre presque bleue. En décembre, M. Cornu fit l'analyse suivante de la lumière de la nouvelle étoile :

Il trouva son spectre composé « d'un certain nombre de lignes brillantes, se détachant sur une sorte de fond lumineux, interrompu presque complètement entre le vert et l'indigo, de

sorte qu'à première vue il lui parut formé de deux parties séparées ». Les huit raies brillantes qu'il désigne dans l'ordre de leur éclat par les lettres α, β, γ, δ, ε, η, ζ, θ, sont représentées dans la figure 138.

α, η et ε correspondent presque identiquement avec trois raies de l'hydrogène (C, F, et 434). δ est la raie du sodium ou peut-être plutôt celle de la raie D^3 (hélium) de la chromosphère solaire ; β correspond à la triple raie *c* du magnésium ; mais ce qui est d'un haut intérêt, c'est la coïncidence probable des raies γ et θ avec deux raies dont l'une (1474 de Kirchhoff) est une des raies caractéristiques de la chromosphère et de la couronne, et la seconde appartient aussi à la chromosphère. « En résumé, la lumière de l'étoile paraît posséder exactement, dit M. Cornu, la même composition que celle de l'enveloppe du Soleil nommée chromosphère. »

§ 3. ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE DES NÉBULEUSES.

L'étude télescopique des nébuleuses, de ces sortes de nuages célestes répandus en si grand nombre dans les régions sidérales, avait laissé une certaine indécision dans la question de savoir si toutes sont ou non résolubles, c'est-à-dire décomposables en étoiles ; si, outre les amas stellaires, il existe des masses véritablement nébuleuses, composées d'une matière diffuse brillant d'une lumière *sui generis*, probablement incandescente. On pouvait toujours admettre que les nébuleuses non résolues par les télescopes les plus puissants étaient, comme les autres, des amas d'étoiles, mais des amas trop éloignés pour que la décomposition fût possible. Il était réservé à l'analyse spectrale de résoudre ce problème si intéressant d'astronomie physique. Indiquons brièvement les résultats obtenus.

C'est à M. Huggins que revient l'honneur d'avoir le premier appliqué le spectroscope à l'étude de la lumière des nébuleuses, et c'est une nébuleuse de la constellation du Dragon qui a été la première analysée par lui, en 1864. Son spectre lui parut

formé uniquement de trois raies brillantes isolées; ce n'est donc pas un amas d'étoiles distinctes, mais une véritable nébulosité, une agglomération de matière gazeuse, lumineuse ou incandescente. La plus brillante des trois raies observées coïncidait avec la plus forte des raies particulières à l'azote ; la plus faible avec la raie verte de l'hydrogène; enfin la raie intermédiaire, peu éloignée de celle du baryum, ne coïncide pas toutefois avec elle. Les trois raies brillantes se détachaient d'ailleurs sur une bande colorée, formant un spectre continu extrêmement faible, presque sans largeur, comme s'il provenait d'un point lumineux situé au centre de la nébulosité. La nébuleuse en question, qu'on rangeait auparavant parmi les nébuleuses planétaires, possède en effet un noyau petit, mais très brillant. Huggins en conclut que probablement la matière formant ce noyau n'est pas à l'état de gaz, comme celle dont il est environné, qu'elle est sous la forme d'un brouillard de particules solides ou liquides incandescentes.

Le même savant a étudié en tout soixante-dix nébuleuses. Un tiers environ a présenté une constitution analogue à celle de la nébuleuse du Dragon, leurs spectres se réduisant à une ou plusieurs raies brillantes; les autres ont donné au contraire des spectres continus. Cette proportion de 1 : 2 des nébuleuses gazeuses aux nébuleuses stellaires est peut-être plus forte que ne donnerait l'examen spectroscopique de la totalité des nébuleuses. M. Huggins, en effet, a choisi spécialement pour en faire l'objet de ses études celles dont les caractères (la forme et la couleur) lui paraissaient devoir présenter une constitution gazeuse.

Citons parmi les nébuleuses de constitution gazeuse, et dont le spectre est formé de trois raies brillantes, une petite nébuleuse du Verseau, qui, dans le télescope de lord Rosse, apparaissait sous la forme d'un globe coupé par un anneau vu par sa tranche, ainsi qu'on voit Saturne à l'une de ses phases; puis une autre nébuleuse de structure semblable, mais où l'anneau, vu de face, entoure le globe lumineux. Une nébuleuse spirale a

donné quatre raies brillantes. La nébuleuse annulaire de la Lyre, ainsi que Dumb-bell, la célèbre nébuleuse du Renard, ont des spectres formés d'une raie brillante unique, qui est la plus forte des trois raies de la nébuleuse du Dragon.

Enfin, la grande nébuleuse de θ d'Orion, qui par sa teinte bleu-verdâtre ressemble aux nébuleuses précédentes, a également fourni un spectre composé de quatre raies brillantes ; ces raies sont bien définies et leurs intervalles tout à fait obscurs ; la plus brillante et la moins réfrangible coïncide avec l'une des composantes de la double raie de l'azote ; la seconde est peut-être une ligne du fer, et les deux autres sont en coïncidence exacte avec les lignes F et G de l'hydrogène. La nébuleuse d'Orion est donc encore une nébulosité gazeuse.

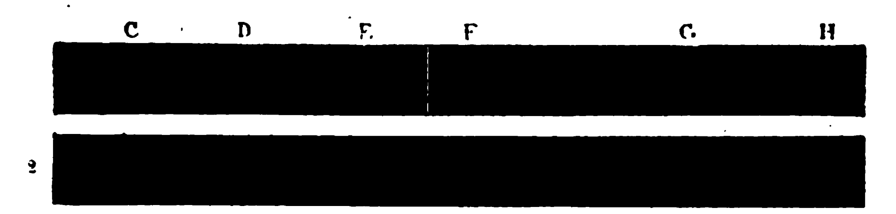


Fig. 159 — Spectres de la lumière des nébuleuses : 1, nébuleuse du Dragon ; 2, nébuleuse d'Orion. D'après W. Huggins.

La nébuleuse d'Andromède est de constitution toute différente. Son spectre n'est plus formé de raies brillantes séparées : il donne une bande de lumière continue, mais il est incomplet : le rouge et une partie de l'orangé manquent. Or les véritables amas stellaires, les nébuleuses résolues par le télescope en points brillants distincts ont également un spectre continu ; ainsi l'amas stellaire d'Hercule donne un spectre semblable. Ce résultat s'accorde donc bien avec les observations de Bond, qui a décomposé en partie la nébuleuse d'Andromède et y a compté jusqu'à 1500 étoiles distinctes.

En résumé, sur 60 nébuleuses dont la lumière a été analysée par Huggins, 41 ont donné un spectre continu. Sur ce nombre, il y a 10 amas stellaires et 15 autres nébuleuses considérées par les astronomes comme résolubles en étoiles. Aucune des

19 nébuleuses donnant un spectre formé de raies brillantes n'a pu être résolue en étoiles.

§ 4. L'ANALYSE SPECTRALE ET LA QUESTION DES MOUVEMENTS RÉELS DES ÉTOILES.

Pour terminer ce que nous avions à dire des applications de l'analyse spectrale à l'astronomie, nous rappellerons ici ce qui a été dit, dans le premier volume du MONDE PHYSIQUE, de l'influence du mouvement sur la hauteur du son. Quand, par le fait du mouvement de l'observateur ou du corps sonore (cela n'importe point), la source d'où émanent les ondes sonores s'éloigne, le son devient plus grave ; il semble plus aigu si la source se rapproche. Nous avons indiqué la raison de cette modification, qui provient de ce que les ondes sonores, dans la deuxième période, arrivent à l'oreille dans un temps donné, une seconde je suppose, en plus grand nombre que si le corps sonore était en repos : le son paraît donc formé par un plus grand nombre de vibrations, et par suite plus aigu; dans la première période au contraire, les vibrations arrivent moins nombreuses, et la hauteur du son est diminuée. Virtuellement, les longueurs d'onde sont augmentées dans le premier cas et diminuées dans le second.

Or la lumière est, comme le son, produite par des vibrations périodiques; les ondulations les plus rapides ou les plus courtes sont celles qui correspondent aux parties les plus réfrangibles du spectre, les plus longues ou les moins rapides aux parties qui ont la moindre réfrangibilité.

Dès lors, le mouvement d'une source lumineuse, si toutefois sa vitesse est comparable à celle de la lumière, doit influer aussi sur l'apparente réfrangibilité des rayons ou des ondes qui la composent, augmenter cette réfrangibilité si la source s'approche de l'observateur, la diminuer si elle s'éloigne. C'est M. Doppler qui a appelé le premier l'attention sur le rapport qui doit exister entre les couleurs des étoiles et leurs mouve-

ments. Selon lui, toutes les étoiles sont blanches; seulement celles qui s'éloignent paraissent rouges, et celles qui se rapprochent ont une lumière tirant sur le vert ou le bleu. Mais, ainsi que l'a fait remarquer Secchi, avec raison croyons-nous, la lumière blanche renferme des rayons plus réfrangibles que le violet et d'autres rayons moins réfrangibles que le rouge. L'effet du mouvement rendrait donc sensibles à l'œil les uns ou les autres de ces rayons, et, la quantité des rayons de réfrangibilité diverse restant toujours la même, la couleur ne paraîtrait point modifiée.

Pour que l'hypothèse de M. Doppler pût se vérifier, il faudrait que la lumière d'une étoile, au lieu d'être composée d'une multitude d'ondes de longueurs ou de réfrangibilités différentes, fût monochromatique. Cette difficulté a été résolue par l'analyse spectrale. Nous venons de voir que les spectres des lumières stellaires sont sillonnés, comme celui du Soleil, de raies ou bandes sombres, et que, parmi ces raies, un certain nombre ont pu être identifiées avec les raies spectrales de quelques corps simples terrestres, par exemple des métalloïdes comme l'hydrogène, ou des métaux, magnésium, sodium, fer, etc.

Supposons donc que l'observateur, étudiant le spectre d'une étoile où se trouve marquée, par une raie déterminée, la présence du magnésium, emploie le même spectroscope à analyser simultanément la lumière de l'étoile en question et la lumière artificielle du magnésium. Si la Terre et l'étoile sont en repos relatif, la raie en question devra coïncider parfaitement dans les deux spectres superposés. Si, au contraire, l'étoile est en mouvement, et si elle s'approche ou s'éloigne avec une vitesse suffisamment grande, l'observateur constatera une déviation de la raie du magnésium soit vers le violet, soit vers le rouge; le sens et la mesure de cette déviation lui permettront de calculer la vitesse avec laquelle l'astre se meut, vitesse relative, qui comprend la vitesse même de notre planète et celle du système solaire au moment de l'observation.

C'est là une recherche d'une grande difficulté, parce que,

même pour une vitesse considérable de l'étoile, la déviation à mesurer est très petite. Les premiers astronomes qui ont appliqué cette méthode à l'étude des mouvements stellaires, Huggins et Miller, Maxwell, Secchi, n'ont pu tout d'abord réussir. Mais le perfectionnement des procédés d'observation a donné à la fin des résultats positifs. En 1868, M. Huggins est parvenu à constater un très léger changement de réfrangibilité dans l'une des lignes du spectre de Sirius, et il a conclu de ses mesures qu'alors l'étoile et la Terre s'éloignaient avec une vitesse comprise entre 42 et 58 kilomètres par seconde. Il fallait en déduire la composante, dans la direction de Sirius, de la vitesse propre de la Terre dans son orbite (vitesse qui est toujours connue à l'époque de l'observation) pour obtenir la vraie vitesse de l'étoile. Toutes corrections faites, M. Huggins put dire que Sirius, à cette époque, s'éloignait de nous en parcourant de 29 à 35 kilomètres dans le sens du rayon visuel.

Depuis, le même observateur d'un côté, et de l'autre M. Christie, astronome de l'Observatoire de Greenwich, ont étudié et mesuré les mouvements d'une certain nombre d'étoiles, et leurs résultats concordants témoignent en faveur de cette nouvelle et curieuse application de l'analyse spectrale aux questions astronomiques.

CHAPITRE IX

LES RADIATIONS SOLAIRES LUMINEUSES, CALORIFIQUES ET CHIMIQUES

§ 1. COEXISTENCE DES PROPRIÉTÉS LUMINEUSE, CALORIFIQUE ET CHIMIQUE DU SPECTRE.

En nous reportant aux expériences décrites dans le chapitre VII, nous voyons que tout faisceau de lumière blanche est composé d'une multitude de radiations qui diffèrent par leur degré de réfrangibilité et par leur couleur. Si la lumière décomposée par le prisme appartient à un solide ou à un liquide incandescent, par exemple à un bain de platine fondu (au blanc éblouissant), le spectre est continu ; il contient des radiations dont la réfrangibilité va en croissant par degrés insensibles, depuis le rouge sombre jusqu'à l'extrême violet. Si la lumière est celle d'un gaz, le spectre est, au contraire, formé d'un certain nombre de raies brillantes séparées par des espaces sombres plus ou moins larges. Si enfin la lumière émane d'une source qui, seule, donnerait un spectre continu, si de plus elle traverse un milieu absorbant, une atmosphère gazeuse plus ou moins complexe, alors le spectre présentera un nombre plus ou moins considérable de raies noires : la continuité en sera interrompue par ces lignes, qui correspondent précisément aux raies brillantes que donneraient les substances de l'atmosphère absorbante, si leur lumière était analysée isolément par le prisme : tel est le spectre de la lumière du Soleil.

Deux caractères, comme on voit, distinguent les unes des

autres les diverses radiations, la ***réfrangibilité*** et la ***couleur;*** ces deux propriétés sont d'ailleurs indissolublement liées l'une à l'autre, de sorte qu'à un rayon lumineux de réfrangibilité déterminée correspond toujours la même couleur ou la même nuance.

Nous savons déjà (mais bientôt nous insisterons davantage sur ce point en exposant la théorie de la lumière) que la cause des phénomènes lumineux provient d'un mouvement vibratoire des sources, lequel se propage dans l'éther sous la forme d'ondulations excessivement rapides et excessivement courtes : c'est par trillions que l'on compte le nombre des vibrations effectuées en une seconde par une molécule d'éther, et par millionièmes de millimètre que se mesure la longueur d'onde ou le chemin parcouru par l'ondulation pendant le même temps. Le phénomène est analogue à celui des ondes sonores, sauf la question de nombre et de mesure, sauf aussi le mode de propagation. On a vu que les sons diffèrent de *hauteur* et que cet élément dépend du nombre des vibrations dans l'unité de temps de la source sonore, tandis que la force ou l'intensité du son est liée à l'amplitude des ondes. Dans les phénomènes lumineux, le nombre des vibrations ou la longueur d'onde est ce qui différencie les radiations au point de vue de la réfrangibilité, ou de la couleur. Ainsi la couleur de la lumière est l'analogue de la hauteur du son; l'intensité lumineuse se mesurerait également par l'amplitude des ondulations éthérées.

Enfin, il y a une autre analogie entre le son et la lumière. De même que l'échelle des sons perceptibles au point de vue de la hauteur est comprise entre deux limites, l'une inférieure, l'autre supérieure, de même les radiations lumineuses sont renfermées entre deux extrêmes, qui sont les limites du spectre visible. La lumière solaire, qui est de beaucoup la plus puissante des sources lumineuses connues, est formée de radiations qui s'étendent un peu au delà de la raie A de Frauenhofer du côté du rouge, et un peu au delà de la raie H dans le violet.

Toutefois ces limites ne sont relatives qu'aux radiations sus-

ceptibles de produire une impression sur la rétine et de déterminer en nous la sensation de la lumière. Or cette propriété des radiations solaires d'être perçues par l'œil est tout entière subjective, c'est-à-dire ne dépend que de la conformation de notre organe visuel et de notre sensibilité, qui est une aptitude purement physiologique. En réalité, ces radiations jouissent encore de deux autres propriétés : d'une part, elles ont sur les corps qu'elles frappent une action échauffante, elles élèvent leur température; d'autre part, elles modifient à des degrés divers certaines substances, de manière à produire des combinaisons ou des décompositions chimiques. En un mot, les radiations solaires ne sont pas seulement *lumineuses;* elles sont simultanément *calorifiques* et *chimiques*.

Ces propriétés, qui coexistent dans un même faisceau de lumière solaire, ne pouvaient être utilement étudiées qu'en les soumettant à l'analyse prismatique, de la même manière qu'on l'a fait pour les rayons de diverses réfrangibilités. Or l'étude des trois spectres, lumineux, calorifique et chimique, a conduit à cette conséquence d'un haut intérêt, à savoir que le spectre lumineux compris entre les raies A et H de Frauenhofer est loin de donner l'étendue véritable du spectre solaire complet, ou si l'on veut, qu'il y a des radiations calorifiques et des radiations chimiques au delà des radiations lumineuses. Avant de décrire les expériences qui ont conduit à ce résultat, entrons dans quelques détails sur les intensités relatives des diverses parties qui composent le spectre lumineux, ou, ce qui revient au même, sur l'éclat des diverses couleurs du spectre solaire.

Quand on compare, dans le même spectre, les intensités lumineuses des sept couleurs principales, on reconnaît immédiatement que c'est dans le jaune que se trouve la partie la plus brillante. A partir de ce point, l'éclat diminue, qu'on aille soit du côté de l'extrême rouge, soit du côté du violet. De plus, on voit que les couleurs peuvent se ranger naturellement en deux classes : la première comprenant les couleurs *lumineuses*, le rouge, le jaune, le vert; la seconde, les couleurs *sombres*, le

bleu, l'indigo, le violet, auxquelles on peut joindre les rayons de l'extrémité rouge. Une expérience très simple permet de juger de la différence qui existe entre les pouvoirs éclairants des diverses couleurs, sinon de la mesurer : qu'on prenne les pages d'un livre, et qu'on reçoive le spectre sur la partie imprimée du papier, on verra que les caractères seront aisément lisibles dans l'orangé, le jaune et le vert, tandis qu'on aura de la peine à déchiffrer ceux qui reçoivent les autres couleurs. C'est en procédant ainsi, et en recherchant à quelle distance maximum la lecture était possible dans les diverses régions du spectre, qu'Herschel a trouvé que la plus grande intensité lumineuse se trouvait dans le jaune et le vert.

D'après Frauenhofer, qui a étudié photométriquement les intensités lumineuses des couleurs du spectre, c'est entre les raies D et E, à la limite du jaune, que se trouve le maximum d'éclat; mais ce point est plus rapproché de D, et sa distance à cette dernière ligne est environ la dixième partie de l'intervalle total DE. Des méthodes plus précises ont permis d'apprécier numériquement les pouvoirs éclairants du spectre, aux points où il est coupé par les huit principales raies de Frauenhofer. En évaluant à 1000 l'éclat maximum, voici quelles sont les intensités lumineuses dont il s'agit :

Couleurs.	Intensités lumineuses.	Raies.
Extrême rouge	insensible	A
Rouge	32	B
	94	C
Orangé.	640	D
Jaune.	1000	»
Vert.	480	E
Bleu	170	F
Indigo.	31	G
Extrême violet.	6	H

Quand nous parlerons des procédés qui constituent la photométrie, dont l'objet est la comparaison des intensités lumineuses, nous dirons comment ces mesures ont pu s'effectuer. Mais dès maintenant nous devons faire remarquer qu'elles ne

sont pas susceptibles de beaucoup d'exactitude, attendu que la comparaison n'est rigoureusement possible qu'entre des lumières

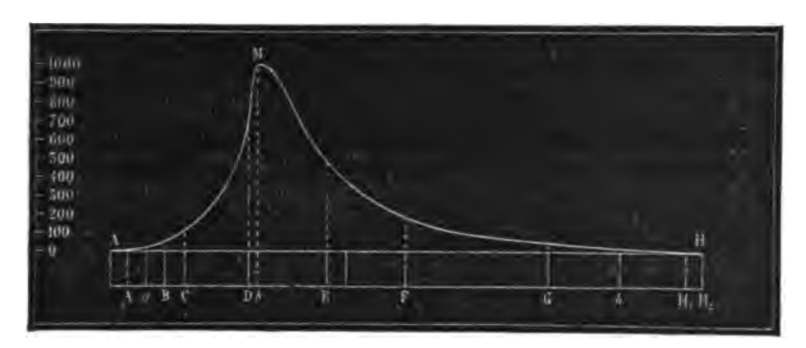


Fig. 140. — Courbe des intensités lumineuses des diverses parties du spectre, d'après Frauenhofer.

qui ont la même teinte ; or il n'en est pas ainsi des régions du spectre, si dissemblables au point de vue de la couleur.

§ 2. RADIATIONS CALORIFIQUES DU SPECTRE. — SPECTRE ULTRA-ROUGE.

La chaleur des rayons solaires se distribue-t-elle également dans toute l'étendue du spectre, ou au contraire les divers rayons colorés, outre leur différence d'intensité lumineuse, possèdent-ils aussi des pouvoirs calorifiques inégaux ? A cette question que les physiciens se sont depuis longtemps posée, on ne répondit d'abord que par une hypothèse qui semblait assez naturelle : c'est que l'intensité de la radiation calorifique était, dans le spectre, proportionnelle à l'intensité de la radiation lumineuse, et l'hypothèse sembla confirmée par les expériences dues à Rochon et à Sennebier. D'après ces expériences, les rayons les plus lumineux étaient aussi les plus chauds, de sorte que le maximum de chaleur leur parut être situé dans le jaune ; mais bientôt d'autres physiciens assurèrent que ce maximum était dans le rouge, ou à l'extrémité du rouge. En 1800, sir W. Herschel reprit expérimentalement cette question intéressante. Il promena la boule d'un thermomètre dans les régions successives du spectre formé avec un prisme de flint ;

il reconnut ainsi que la température va en croissant du violet jusqu'au rouge. Il eut l'idée de pousser plus loin l'expérience, et il constata avec surprise que le maximum de chaleur était au delà du rouge extrême, en un point où l'œil ne percevait aucune trace de lumière. D'où cette conséquence que, dans la lumière solaire, il existe des radiations invisibles qui produisent de la chaleur et dont le degré de réfrangibilité est moindre que celui des rayons rouges du spectre lumineux. Herschel ne put déterminer la limite de cette partie du spectre calorifique; « il se contenta, dit Brewster, de s'assurer que, même en un point éloigné de 1 pouce 1/2 (38 millimètres) de l'extrémité rouge, les rayons invisibles avaient une chaleur considérable, quand même le thermomètre était à 52 pouces (1^m,32 du prisme). »

On vient de voir que le maximum de chaleur fut trouvé en divers points du spectre, tantôt dans le jaune (Rochon et Sennebier), tantôt dans le rouge ou précisément à l'extrême rouge (Bérard), tantôt enfin au delà du rouge (Herschel). Selon Seebeck (1828), toutes ces opinions sont vraies, parce que, la chaleur transmise par les rayons colorés se trouvant inégalement absorbée suivant la nature du prisme, la position du maximum calorifique doit dépendre de la substance de ce dernier. Et, en effet, ce physicien fit voir que les rayons calorifiques les plus intenses sont ceux du jaune, de l'orangé, du rouge ou de l'extrême rouge, suivant qu'on a dispersé la lumière solaire à l'aide de prismes formés avec de l'eau ou de l'alcool, de l'acide sulfurique concentré, du verre ordinaire, du crown-glass ou du flint-glass anglais.

Les expériences de Melloni démontrèrent que les divers résultats ainsi obtenus pour la position du maximum de température dans le spectre ne sont pas contradictoires. Ils tiennent à ce qu'il y a une absorption des rayons calorifiques qui dépend à la fois et de leur réfrangibilité et de la substance du prisme. Comme le sel gemme absorbe peu ou point la chaleur, que celle-ci soit obscure ou lumineuse, c'est avec un prisme de cette substance qu'on peut le mieux comparer les pouvoirs

calorifiques des divers rayons colorés. En opérant de cette façon, Melloni a prouvé que la température de ces rayons va en s'élevant du violet au rouge ; c'est au delà du rouge, dans le prolongement du spectre, que se trouve le maximum, à une distance **An** de la limite extrême du rouge égale à celle qui existe entre cette limite et le bleu-vert. Au delà, la chaleur décroît, mais elle est encore sensible quand on arrive à une distance du rouge égale à toute l'étendue du spectre lumineux. Muller et Franz ont repris les expériences de Melloni. On voit, dans la figure 141 les courbes d'intensité calorifique obtenues avec



Fig. 141. — Courbes des intensités calorifiques, d'après Muller : X'mH, courbe obtenue avec un prisme de sel gemme; X'm'H, courbe obtenue avec un prisme de crown.

deux prismes, l'un de sel gemme (courbe X'*m*H), l'autre de crown (courbe X'*m*'H).

D'après Melloni, « le maximum de température dans le spectre calorifique normal du Soleil ne se trouve pas toujours dans la même position, mais tantôt plus, tantôt moins éloigné de la limite rouge, bien que le ciel, dans les différentes journées où l'on fait l'expérience, soit doué en apparence de la même limpidité ». Il attribue ces changements, qui se manifestent seulement dans les radiations obscures sans toucher aux intensités relatives des radiations lumineuses, aux différences d'humidité des couches inférieures ou supérieures de l'atmosphère, laquelle serait ainsi douée d'une sorte de *coloration calorifique* ou de *thermochrose*[1].

1. *Mémoire sur l'identité des diverses radiations lumineuses, calorifiques et chimiques*, par M. Melloni

En prenant la lumière de l'arc voltaïque comme source, et en opérant avec un prisme de sel gemme, Tyndall a trouvé que la radiation calorifique s'étend plus loin du côté des rayons

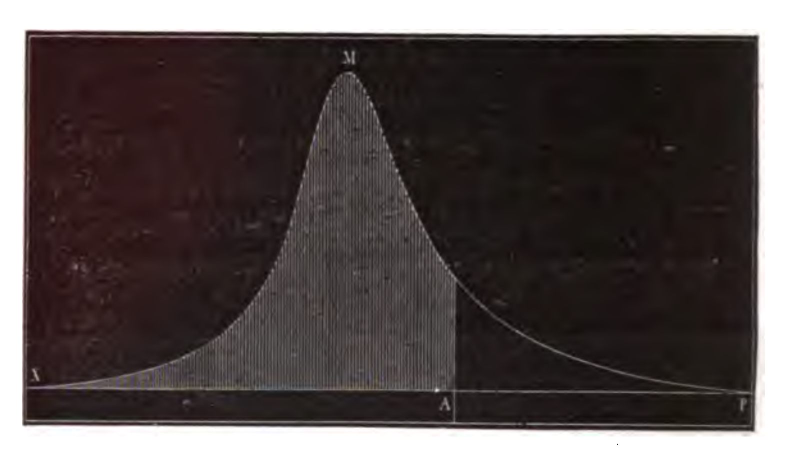


Fig. 142. — Courbe des radiations calorifiques dans le spectre de l'arc voltaïque, d'après Tyndall.

les moins réfrangibles qu'on ne le trouve dans le spectre solaire. Ce résultat vient à l'appui de l'opinion de Melloni que l'atmosphère agit par absorption sur les radiations obscures les plus réfrangibles des rayons solaires.

§ 3. RADIATIONS CHIMIQUES DU SPECTRE. — SPECTRE ULTRA-VIOLET.

Tout le monde connaît l'influence de la lumière du Soleil sur les couleurs matérielles, quand ces couleurs sont appliquées soit sur des étoffes, soit sur du papier, du bois et diverses autres substances organiques. Les rideaux de tenture pâlissent à la lumière du jour, les toiles écrues de teinte jaunâtre blanchissent quand on les expose au soleil. On sait aujourd'hui combien la lumière est nécessaire au complet épanouissement, à la santé, à la vie même des végétaux et des animaux. Or ces influences multiples, sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir ailleurs, consistent, en dernière analyse, en une suite d'actions chimiques, en des décompositions ou combinaisons de substances. Du chlore et de l'hydrogène qui, dans l'obscu-

rité, n'ont aucune action l'un sur l'autre, exposés à la lumière se combinent, et forment de l'acide chlorhydrique. Si le flacon qui les contient est placé dans un lieu éclairé par la lumière diffuse du jour, la combinaison s'effectue lentement; aux rayons solaires, elle se fait subitement et avec explosion. La lumière décompose les sels d'or, d'argent, de platine. L'héliographie, découverte par Niepce et Daguerre, et tous les procédés actuels de la photographie sont basés sur l'action chimique des rayons lumineux provenant soit du Soleil, soit de la Lune, soit d'autres sources d'une intensité suffisante. Nous décrirons ces procédés plus tard : il suffit en ce moment de constater les phénomènes.

La même question se présente ici que pour les pouvoirs éclairants et calorifiques : il s'agit de savoir si les différentes régions du spectre solaire sont douées de la même faculté au point de vue chimique, ou si leur efficacité varie de l'une à l'autre. Or Scheele qui, dès 1777, avait constaté l'action de la lumière sur le chlorure d'argent, reconnut aussi que les rayons colorés du spectre agissent inégalement pour produire cette décomposition. Seebeck découvrit ensuite que les radiations chimiques augmentent d'intensité du rouge au violet, au point que le chlorure en question noircit en quelques minutes quand il reçoit les rayons concentrés de la partie violette du spectre, tandis qu'il faut plusieurs heures s'il reçoit les rayons du vert au rouge. Vinrent enfin les observations de Wollaston et de Ritter, qui prouvèrent qu'au delà du violet extrême, dans la partie obscure du spectre, l'action chimique continue à une distance considérable de la partie lumineuse. L'intensité de la radiation chimique qui varie, pour une même substance, suivant la position des rayons dans le spectre, n'atteint pas son maximum au même point pour des substances différentes. Ce maximum n'est pas le même pour les sels d'argent que pour les sels d'or, ni pour ceux-ci que pour les sels de potasse.

J. Herschel, en 1840, étudiant l'action du spectre solaire sur des substances chimiquement impressionnables, s'attacha à constater s'il existe dans le spectre chimique des interruptions

correspondant à celles qu'indiquent les raies noires du spectre lumineux : il ne put y parvenir. Cette question intéressante a été reprise peu après par M. Edmond Becquerel. Voici comment ce savant décrit les procédés d'observation qui le conduisirent à un plein succès : « La méthode dont je fis usage, dit-il, consiste à projeter sur un écran un spectre produit par un prisme de flint-glass très pur et une lentille de 1 mètre de foyer. La lentille est placée immédiatement derrière le prisme, à 2 mètres de la fente par laquelle entrent les rayons solaires; l'écran est situé à 2 mètres environ de la lentille et est disposé pour recevoir les papiers enduits de matières impressionnables (sels d'argent, etc.), ou bien les plaques iodurées. Après une exposition plus ou moins longue, on trouve représentées sur

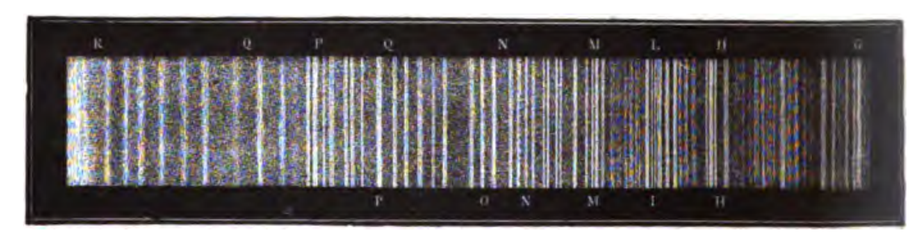


Fig. 143. — Partie violette et ultra-violette du spectre solaire. Radiation chimique.

les surfaces impressionnables un très grand nombre de raies (fig. 143). En mesurant leurs distances respectives, on reconnaît qu'entre A et H, ce sont les mêmes raies que pour les rayons lumineux et identiquement aux mêmes places..... Au de là de H, le spectre chimique a une infinité de raies ; jusqu'en M à peu près, elles sont encore les mêmes que celles du spectre lumineux ; au delà les rayons lumineux s'affaiblissent toujours, et on ne peut plus les comparer. » La figure 143 représente les raies de la partie violette et ultra-violette du spectre chimique, mais avec cette circonstance que c'est ici une épreuve négative, telle qu'on l'obtient si, à la place de la feuille recouverte de chlorure d'argent, on met une plaque collodionnée : les raies noires y sont donc représentées par des raies lumineuses, tandis que les espaces clairs compris entre les raies sont ici for-

més de bandes sombres d'autant plus foncées que l'activité chimique des radiations est plus grande[1].

Le spectre des radiations ultra-violettes a été étudié par divers physiciens, parmi lesquels nous citerons MM. Muller, Draper, Mascart. Ce dernier, en se servant de prismes de spath d'Islande a déterminé la position de 700 raies distinctes, depuis la raie H jusqu'à une raie T qui vient après R de la figure précédente.

Quant à l'intensité des rayons chimiques du spectre solaire, elle varie avec leur réfrangibilité. Elle varie aussi avec la nature des substances impressionnables, de sorte que si l'on construisait des courbes de l'activité chimique comme nous l'avons fait pour les intensités lumineuses et calorifiques, les maxima et les minima de ces courbes varieraient suivant les substances. C'est ce que laisse voir la figure 145, où se trouvent représentés les effets chimiques de l'action de la lumière sur certaines substances.

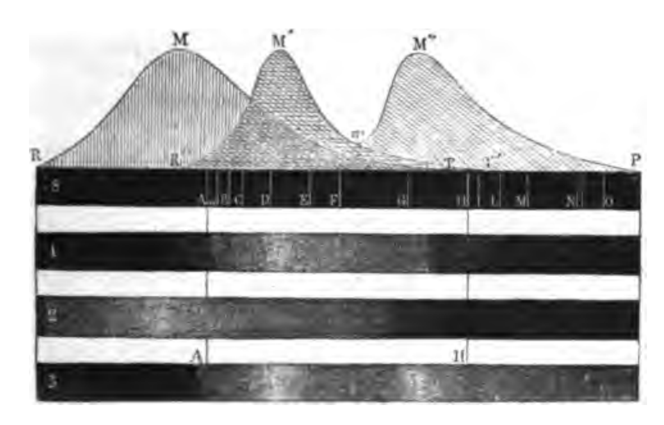


Fig. 144. — Courbes des radiations solaires : 1, spectre lumineux ; R'M'T, intensités lumineuses ; 2, spectre calorifique ; RMT, intensités des radiations de chaleur ; 3, spectre chimique ; R''M''P, courbe des radiations chimiques.

Pour obtenir la mesure de l'action chimique des diverses régions du spectre, M. E. Becquerel a employé une méthode qui consiste à mesurer l'action chimique par l'intensité des

1. Les lettres placées au-dessous du spectre de la figure 143 sont celles qui avaient été choisies par M. E. Becquerel pour la dénomination des principales raies du spectre ultra-violet. Celles du haut ont été proposées par d'autres physiciens, M. Muller, etc.

courants électriques auxquels elle donne naissance. Il a trouvé ainsi que la courbe des intensités des radiations chimiques (fig. 144) coïncide à peu près avec celle des radiations lumi-

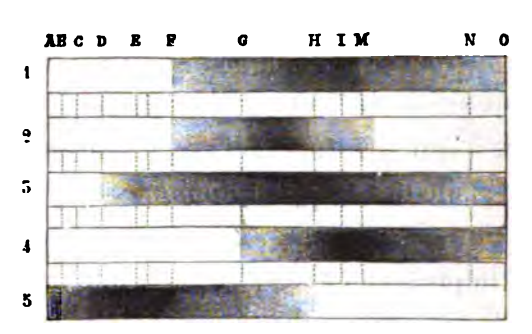


Fig. 145. — Spectres chimiques ou photogéniques : 1, iodure d'argent; 2, chlorure d'or; 3, acide chromique; 4, résine de gaïac; 5, gaïac bleui.

neuses depuis A jusqu'en F, où se trouve un minimum *m*; au delà et en allant vers le violet, elle remonte, atteint un second maximum M″ entre G et H, puis décroît rapidement jusqu'en P où l'activité chimique devient nulle.

§ 4. IDENTITÉ DES TROIS RADIATIONS, LUMINEUSE, CALORIFIQUE ET CHIMIQUE.

Telle est, en résumé, la composition de la lumière ou mieux de la radiation solaire.

Un faisceau de cette radiation se compose d'un nombre indéfini de rayons qui diffèrent les uns des autres par leur réfrangibilité, mais qui ont ce caractère commun de suivre tous, dans leur passage au travers des milieux réfringents, les lois de la réfraction telles qu'elles ont été exposées dans un chapitre précédent. Les indices de réfraction de ces radiations élémentaires vont en croissant, mais non pas d'une manière continue. On y observe des lacunes, ainsi que le prouvent les raies qui sillonnent le spectre solaire en très grand nombre, et dont chacune marque l'absence de la radiation spéciale qui aurait l'indice correspondant.

Nous venons de dire que les radiations solaires différaient par

leur réfrangibilité. Mais elles diffèrent aussi par leur mode d'action. Les radiations moyennes, celles qui constituent la partie lumineuse du spectre solaire, ont la propriété spéciale d'affecter notre rétine ; de plus, à mesure que leur réfrangibilité croît, l'impression lumineuse varie d'intensité; elle varie aussi de couleur. Cette sensation complexe n'existe que dans le faisceau décomposé ; avant de traverser le prisme, toutes ces lumières et ces couleurs réunies produisent sur nous l'impression de la lumière blanche, dont la définition serait alors celle-ci : la réunion des rayons de tous les degrés de réfrangibilité.

Outre la sensation de la lumière, les radiations solaires se manifestent par leur activité calorifique, par la propriété qu'elles ont d'échauffer les corps, d'élever leur température. Mais les degrés de cette propriété ne suivent pas ceux de l'intensité lumineuse : ils vont en croissant à mesure que décroît la réfrangibilité. De plus, cette activité calorifique, loin d'être bornée aux radiations lumineuses, se prolonge au delà de part et d'autre de leurs limites, et c'est en dehors du spectre, au delà du rouge, qu'elle atteint son maximum. En un mot, quand les radiations ont, par le fait d'une décroissance suffisante de réfrangibilité, cessé d'impressionner notre rétine, elles exercent encore leur action sur les corps, et cette action est alors exclusivement calorifique.

Il y a une troisième propriété qui caractérise les radiations solaires : c'est celle que l'on nomme chimique, parce qu'elle consiste dans des combinaisons ou décompositions de certaines substances, dites pour cela *impressionnables*. Seulement, l'intensité de cette activité spéciale, variable avec la réfrangibilité, l'est également quand on soumet aux rayons solaires telle ou telle substance particulière. On reconnaît en général que les radiations lumineuses sont aussi des radiations chimiques, suivant à peu de chose près la même loi de variation d'intensité. Mais il existe, du côté le plus réfrangible du spectre, des radiations obscures à peu près exclusivement chimiques.

Cette composition complexe de la radiation solaire, cette

triple propriété calorifique, lumineuse et chimique des rayons inégalement réfrangibles, provient-elle de ce qu'il y a en réalité des rayons de trois natures distinctes dont les uns produiraient la lumière, les autres la chaleur, les autres enfin l'activité chimique? Ou bien, sont-ce, en réalité, les mêmes radiations élémentaires qui déterminent ces trois effets?

C'est cette dernière hypothèse qui est admise par les physiciens. Nous aurons bientôt l'occasion de voir sur quelles raisons nouvelles ils s'appuient pour admettre cette identité des trois radiations ; mais déjà nous pouvons faire remarquer qu'il est impossible de les distinguer les unes des autres par leur réfrangibilité, puisque toutes suivent la loi de Descartes, et que là où l'analyse spectrale signale une lacune ou une raie sombre dans le spectre lumineux, elle existe au même point pour le spectre calorifique et pour le spectre chimique.

CHAPITRE X

LES SOURCES DE LUMIÈRE — PRODUCTION ET TRANSFORMATION DES RADIATIONS

§ 1. L'INCANDESCENCE. — INCANDESCENCE DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

Tous les corps, solides, liquides ou gazeux, portés à une température élevée, deviennent lumineux dans l'obscurité. Ils sont alors à l'état d'*incandescence.* Ce phénomène est souvent accompagné de combinaisons chimiques qui ont lieu principalement entre un ou plusieurs éléments du corps et l'oxygène de l'air, et alors il y a combustion. Nous avons journellement sous les yeux des exemples de faits de ce genre. Le feu n'est autre chose que l'incandescence d'un corps, c'est-à-dire le dégagement de chaleur et de lumière au sein d'une masse de matières organiques ou minérales, dont la température a été élevée à un certain degré. Outre les parties solides, devenues lumineuses, morceaux de charbon ou de braise, de houille ou de coke, le feu contient des flammes, plus ou moins vives, c'est-à-dire des gaz incandescents.

Mais il faut distinguer entre l'incandescence simple des solides et même des liquides, qui peut avoir lieu sans qu'il y ait combustion ou quand la combustion proprement dite a cessé, de l'incandescence produite par les combinaisons chimiques elles-mêmes. Ainsi, la plupart des métaux rougissent au feu : quelques-uns, avant de devenir lumineux, changent d'état et se fondent, mais le métal liquide devient rouge lui-même, sans

qu'il y ait eu de combustion. Les pierres, le verre, la terre, etc., rougissent de la même façon.

Une spirale d'acier qu'on enflamme sous une cloche pleine d'oxygène et qui jaillit en étincelles brillantes (fig. 146), est au contraire un exemple d'un métal devenu incandescent par la combustion. La haute température est ici produite par une combinaison chimique, celle l'oxygène avec le fer.

Il en est autrement du bois et des autres matières organiques et végétales, qui se décomposent en brûlant, et dégagent des gaz qui brûlent sous la forme de flammes plus ou moins vives et plus ou moins colorées. Le charbon de bois, le coke, brûlent presque sans flamme; il est vrai que ces corps ont déjà subi une combustion partielle.



Fig. 146. — Combustion du fer dans l'oxygène.

Les différents corps deviennent-ils lumineux à la même température, et s'il en est ainsi, quelle est la température à laquelle ils commencent à émettre assez de lumière pour devenir lumineux dans l'obscurité? On admettait généralement que c'est entre 500° et 600° centigrades que tous les corps commencent à émettre de la lumière, lumière d'abord faible et d'une couleur rouge sombre. Mais M. Edmond Becquerel a fait sur ce sujet des expériences d'où il résulte « qu'on peut, sans erreur bien grande, prendre un terme compris entre 480° et 490° pour celui où les corps solides commencent à émettre quelque trace de lumière dans l'obscurité par l'action de la chaleur, ou bien en nombre rond celui de 500°, qui a été admis généralement jusqu'ici pour la limite où les substances commencent à devenir visibles dans une enceinte faiblement éclairée. » (*La Lumière*, t. I.) On trouve la même limite de température, ou 500°, pour l'incandescence des corps très peu lumineux, par exemple pour celle

des gaz, des flammes, dont nous parlerons dans le paragraphe suivant.

Si maintenant on élève de plus en plus la température au-dessus de 500°, l'intensité de la lumière émise va en augmentant, sa teinte change, devient de plus en plus blanche, ce qui revient à dire qu'elle se compose de rayons de plus en plus réfrangibles : « De sorte, dit M. Becquerel, qu'à une température qui ne dépasse pas beaucoup celle de la fusion de l'or, la lumière émise est sensiblement blanche, et donne des rayons compris entre les limites de réfrangibilité des raies obscures A et H qui terminent les deux extrémités visibles du spectre solaire. »

Voici, pour le platine, à quelles températures s'obtiennent les diverses teintes qui se succèdent depuis le rouge sombre jusqu'au blanc le plus intense. Elles ont été déterminées, à 50° près, à l'aide du pyromètre de M. Pouillet :

Rouge naissant . . .	525°	Orangé foncé.	1100°
Rouge sombre. . . .	700°	Orangé clair.	1100°
Cerise naissant. . . .	800°	Blanc	1300°
Cerise.	900°	Blanc soudant	1400°
Cerise clair	1000°	Blanc éblouissant. . .	1500°

Des expériences dues à M. Becquerel il résulte qu'un certain nombre de corps opaques, les métaux inoxydables comme le platine et le palladium, le charbon, l'asbeste, la chaux, ont sensiblement le même pouvoir d'irradiation, à mesure que la température s'élève ; jusqu'à leurs points de fusion, les métaux oxydables comme le cuivre sont doués d'une moindre irradiation : ce qui tient sans doute à la couche d'oxyde qui les enveloppe; mais, une fois le point de fusion atteint, l'intensité de la lumière devient à peu près égale à celle du platine. Au contraire, l'argent incandescent donne toujours une lumière et plus vive et plus blanche que celle de ce dernier métal.

Divers physiciens, MM. Draper, Zoellner, E. Becquerel, ont cherché à évaluer l'intensité de la lumière émise par le platine ou tout autre corps incandescent, à des températures de plus

en plus élevées, et il résulte de leurs expériences que cette intensité va en croissant très rapidement. « En représentant par l'unité, dit M. E. Becquerel, l'intensité de la lumière émise au moment de la fusion de l'argent (916°) par un corps tel que le platine ou un fragment de magnésie ou de chaux placé à côté, à 600° il n'y a environ que les 3 millièmes de cette intensité lumineuse, à 700° les 2 centièmes, à 800° le huitième environ, et à 900° les trois quarts. Lors de la fusion de l'or (1037°), l'intensité lumineuse par irradiation serait plus de 8 fois plus forte que lors de la fusion de l'argent, et lors de la fusion du cuivre 69 fois; à 1200° cette intensité deviendrait 147 fois plus forte, à 1500°, dans cette hypothèse, près de 29 000 fois, et à 200°, limite des observations avec le charbon polaire positif d'une pile, 191 millions de fois; mais ces deux derniers nombres supposent que la loi d'accroissement de l'intensité lumineuse reste la même au delà de 1200°, ce qui n'est pas prouvé. » (*La Lumière*, I.) En restreignant dans la limite des expériences les résultats ainsi obtenus, on voit que la lumière émise par un corps solide incandescent est 45 900 fois plus intense à la température de 1200° qu'à celle de 600°, qui est celle du rouge sombre.

La lumière émise par un solide ou un liquide incandescent jouit d'une propriété caractéristique qui a été mise en évidence par Arago, et dont il sera question dans un chapitre ultérieur: elle offre des traces de polarisation sous un angle suffisamment petit. « On a cru pendant longtemps, dit-il, que la lumière, émanant de tout corps incandescent, arrive à l'œil à l'état de lumière naturelle, lorsque dans le trajet elle n'a été ni partiellement réfléchie, ni fortement réfractée; mais c'était là une erreur. J'ai reconnu que la lumière qui émane, sous un angle suffisamment petit, de la surface d'un corps solide ou d'un corps liquide incandescent, lors même que cette surface n'est pas complètement polie, offre des traces évidentes de polarisation, en sorte que, pénétrant dans la lunette polariscope, elle se décompose en deux faisceaux colorés. La lumière qui émane

d'une substance gazeuse enflammée, d'une substance semblable à celle qui éclaire aujourd'hui nos rues, nos magasins, est toujours au contraire à l'état naturel, quel qu'ait été son angle d'émission. »

Un autre caractère qui distingue la lumière des liquides et des solides incandescents, c'est qu'elle est composée de rayons qui, dans les limites extrêmes de leur réfrangibilité, ont toutes les longueurs d'onde; en d'autres termes, le spectre en est continu; il ne renferme ni raies sombres ni raies ou bandes brillantes[1].

§ 2. INCANDESCENCE DES GAZ.

Un jet de gaz hydrogène pur, brûlant dans l'air ou même dans l'oxygène, donne une lumière d'une très faible intensité, bien que la température en soit fort élevée. Mais si l'on y plonge un fil de platine, un fragment de chaux ou de magnésie, à l'instant il se développe une lumière éblouissante, due à l'incandescence des matières solides métalliques ou réfractaires, portées par le gaz à une température très élevée.



Fig. 147. — Brûleur de Bunsen.

En général, les gaz, bien qu'ils deviennent lumineux comme les corps liquides ou solides à une température d'environ 500°, ont un pouvoir d'irradiation beaucoup plus faible; l'élévation de la température n'accroît ce pouvoir que très faiblement, de sorte qu'une

1. Nous avons vu plus haut qu'il y a une ou deux exceptions, pour l'erbine par exemple, dont la lumière donne un spectre discontinu à raies brillantes, comme ceux des vapeurs métalliques.

flamme qui peut convenir parfaitement comme source de chaleur, est à peine sensible comme source de lumière. Telle est la flamme du brûleur de Bunsen, qu'alimente le gaz d'éclairage mélangé avec l'air : cette flamme est très chaude et très peu lumineuse.

La flamme de l'oxyde de carbone est, comme celle de l'hydrogène, fort peu intense : elle a une faible teinte bleuâtre. Celle du chalumeau à gaz oxyhydrogène, dont la température atteint 2500°, est à peine visible à la lumière du jour.

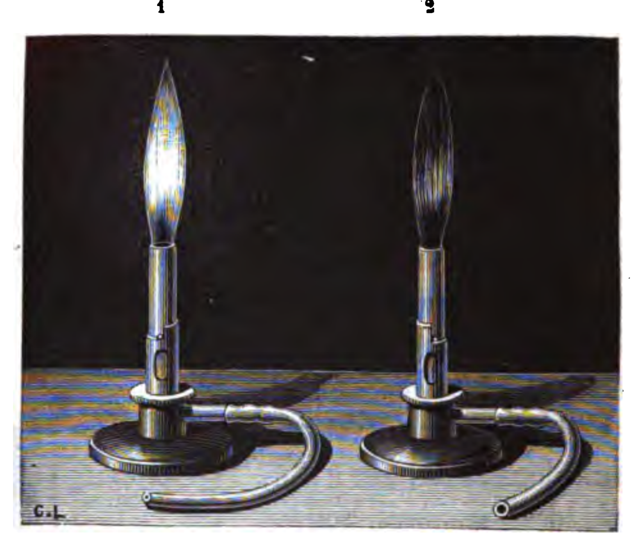


Fig. 148. — Flamme de l'hydrogène carboné : 1, lumineuse et peu chaude; 2, très chaude et peu lumineuse.

C'est à la transparence des flammes ou des gaz incandescents que M. E. Becquerel attribue leur faible pouvoir éclairant, quand elles ne renferment aucun corps solide en suspension. « La flamme provenant de la combustion de l'hydrogène pur est très peu lumineuse, car elle ne donne lieu qu'à la production d'un corps transparent, c'est-à-dire de la vapeur d'eau; mais si l'on plonge dans l'intérieur de cette flamme un corps opaque, comme le platine, la chaux, la magnésie, aussitôt ce corps solide s'échauffe et donne une lumière très vive. Si l'hydrogène se trouve mélangé de gaz carboné, la flamme qu'il produit dans l'air devient par elle-même flamme éclairante par suite de la

présence de parcelles charbonneuses, qui proviennent de la décomposition du gaz et qui brûlent en même temps que lui. »

De tous ces faits et de leur interprétation découle l'explication du pouvoir éclairant des flammes, donnée pour la première fois par Davy. A l'appui de cette théorie, on invoque encore une série d'expériences dont nous allons indiquer les principales.

Si, avant d'enflammer l'hydrogène pur, on fait passer ce gaz dans la benzine, qui est un carbure d'hydrogène très volatil, au lieu d'une flamme à peine visible, on obtient une flamme très brillante : en barbotant dans le liquide carburé, le gaz en a entraîné des parcelles à l'état de vapeur qui, décomposées par la haute température, se précipitent et deviennent incandescentes.





Fig. 149. — Structure de la flamme d'une bougie et coupe de la même flamme.

L'analyse de la flamme d'une bougie est une preuve de la même vérité. Au centre est un cône C, relativement obscur et d'une température peu élevée, puisqu'on peut y introduire un grain de poudre sans que ce grain prenne feu : ce noyau est formé de vapeur d'acide stéarique. Autour de ce cône est une enveloppe A qui forme la partie la plus lumineuse de la flamme. C'est là que l'activité de la combustion décompose les carbures hydrogénés et précipite, à l'état de poudre ténue, le carbone dont la haute température détermine l'incandescence. Tout autour l'hydrogène environne cette partie très lumineuse d'une gaine B, obscure, mais très chaude. Enfin, en D, à la base de la flamme existe une calotte d'une lueur bleu sombre, qu'on attribue à la réaction d'un excès d'air pur sur le gaz hydrocarboné.

En abaissant sur la flamme un morceau de toile métallique, on constate directement la présence du charbon dans la partie lumineuse, par le dépôt de noir de fumée qui se fait sur la toile dans la zone correspondante. Un résultat analogue s'obtient en exposant à la flamme un morceau de porcelaine blanche ; il s'y dépose de la suie.

Un bec de gaz d'éclairage donne lieu aux mêmes constatations. Mais, au contraire, si le gaz est mélangé avec de l'air avant la combustion, — c'est le cas du brûleur de Bunsen, — il brûle presque sans donner de lumière, et, en effet, l'expérience de la toile métallique ou de la plaque de porcelaine ne fournit alors aucun dépôt de noir de fumée ni de suie.

Cette théorie de Davy, jusqu'ici universellement admise, rend parfaitement compte en effet de l'irradiation des flammes où des particules solides, se trouvant précipitées à une haute température, deviennent incandescentes. La lumière si vive du phosphore, du zinc, du magnésium s'explique fort bien ainsi ; il en est de même de la lumière de l'arc voltaïque, qui est due à l'irradiation du carbone, déterminée non plus par une combinaison chimique, mais par l'extrême intensité de la chaleur que développe entre les électrodes le passage de l'électricité.

Cependant de récentes expériences dues à un chimiste anglais, M. Frankland, semblent prouver que la théorie de Davy ne suffit pas à rendre compte du pouvoir éclairant des flammes ; du moins, les expériences de ce savant montrent que les gaz incandescents peuvent acquérir un pouvoir d'irradiation considérable sans qu'il y ait présence de parcelles solides en suspension : un accroissement de pression peut suffire. Par exemple, un mélange d'oxygène et d'hydrogène enfermé dans des bulles de savon ne donne quand on l'enflamme, avec une forte explosion, que très peu de lumière. La même expérience faite dans un vase résistant, où l'expansion déterminée par la combustion ne peut se faire, donne une lumière très vive. On obtient des résultats semblables avec l'hydrogène et le chlore, avec l'oxyde de carbone et l'oxygène.

Une autre expérience de M. Frankland, en contradiction avec la théorie de Davy, est celle-ci : l'arsenic métallique brûle dans l'oxygène avec une lumière blanche très intense, dont la température ne dépasse pas 218°. Donc l'irradiation n'est pas due à des particules solides, qui ne deviennent incandescentes qu'à 500°. Cependant le spectre de la lumière est continu. Mêmes résultats avec le bisulfure de carbone brûlé dans l'oxygène, avec le bioxyde d'azote brûlé dans la vapeur de bisulfure de carbone.

L'influence de l'accroissement de pression sur le pouvoir éclairant des gaz est mise en pleine évidence par l'expérience que voici : L'habile chimiste a fait brûler dans l'oxygène des jets d'hydrogène et d'oxyde de carbone, en élevant graduellement la pression jusqu'à 20 atmosphères. « A 2 atmosphères, le pouvoir lumineux, faible d'abord, se trouve sensiblement augmenté ; à 10 atmosphères, la lumière émise par un jet d'environ un pouce de longueur est parfaitement suffisante pour lire un journal à une distance de deux pieds de la flamme, et sans qu'il y ait aucun réflecteur derrière cette flamme. Examiné au spectroscope, le spectre de cette flamme est brillant et parfaitement continu du rouge jusqu'au violet. »

M. Frankland, tout en reconnaissant que la température influe sur le pouvoir lumineux de la flamme, croit que ce pouvoir résulte surtout de la densité des corps, que l'accroissement de pression rend plus grande. « On peut dire que les degrés relatifs d'éclat lumineux sont presque proportionnels aux densités relatives des différents produits de la combustion. »

M. Henri Sainte-Claire-Deville, tout en partageant dans une certaine mesure les vues du chimiste anglais, dont il regarde les expériences comme douées du plus haut intérêt, les interprète d'une façon différente. A son avis, l'accroissement de pression aurait surtout pour effet d'élever la température de la combustion. Il distingue une flamme *brillante* d'une flamme *éclairante*. Une lumière monochromatique peut être brillante ; il suffit que les rayons qui en émanent aient une grande intensité. Une flamme est éclairante, quand elle possède le plus grand nombre

possible de rayons de diverses réfrangibilités, comme la lumière du Soleil, et que, comme celle-ci, elle est le plus blanche possible. Or les expériences de MM. Fizeau, Wolf et Diacon prouvent qu'à mesure qu'on élève la température d'une flamme monochromatique comme celle du sodium qui est jaune ou celle du lithium qui est rouge, le nombre des raies brillantes de son spectre va en croissant. Ces deux lumières deviennent blanches; elles finissent par contenir des raies brillantes de toute réfrangibilité. Elles deviennent éclairantes, si le métal brûle à une haute température.

En résumé, d'après M. H. Deville, l'éclat d'une flamme dépend à la fois du nombre et de la disposition des raies spécifiques que les substances existant dans cette flamme peuvent donner à l'analyse spectrale, de la température à laquelle ces éléments se trouvent portés, enfin de leur densité.

§ 3. LUMIÈRES ARTIFICIELLES D'UNE GRANDE INTENSITÉ. — LUMIÈRE DRUMMOND; ÉCLAIRAGE AU MAGNÉSIUM. — INTENSITÉ LUMINEUSE DE L'ARC VOLTAÏQUE.

Aucune des lumières qu'on peut produire artificiellement ne peut rivaliser en intensité intrinsèque, — cela va de soi pour l'intensité absolue ou totale, — avec la lumière solaire. Néanmoins on obtient, par divers procédés que nous avons indiqués plus haut, des lumières fort vives.

Telle est la lumière Drummond. C'est celle qui résulte de l'incandescence d'un fragment de craie ou de chaux dans la flamme d'un jet de gaz oxyhydrique, c'est-à-dire d'un mélange de gaz oxygène et de gaz hydrogène. On peut, au lieu de chaux, employer un morceau de magnésie. Aussitôt que la flamme du jet gazeux a échauffé une portion suffisante du fragment solide, la lumière devient éblouissante. M. E. Becquerel a évalué la quantité de lumière produite par un appareil qui dépensait 3 litres 1/2 de gaz par minute; il l'a trouvée équivalente à 20 becs Carcel, c'est-à-dire à environ 160 ou 180 bougies. Or

une lumière aussi intense projetée sur le disque solaire apparaît comme une tache noire.

La lumière oxyhydrique est riche en rayons jaunes et rouges; elle contient les rayons bleus et violets en moindre proportion que les sources dont nous allons parler.

Fig. 150. — Lumière de Drummond.

Un fil de magnésium qui brûle dans l'air ou dans l'oxygène donne une lumière d'une grande vivacité et d'une grande blancheur. Elle renferme en abondance les rayons les plus réfrangibles, les plus actifs au point de vue chimique. Aussi a-t-on imaginé des lampes qui brûlent le magnésium d'une façon continue, le fil étant mû, au fur et à mesure de sa combustion, par un mouvement d'horlogerie. On s'en sert pour suppléer, dans certains cas, à la lumière solaire, notamment pour obtenir des photographies dans les souterrains, dans les cavernes, dans les mines. Un fil de magnésium de 3 millimètres de diamètre brûlant dans l'air a un pouvoir éclairant de 74 bougies; Bunsen a trouvé qu'un décigramme de magnésium brûlant dans l'oxygène donne une lumière équivalente à celle de 110 bougies, bien que la surface incandescente du métal fût sept fois moindre que



Fig. 151. — Lampe au magnésium.

la flamme d'une bougie. Ainsi l'éclat intrinsèque de la lumière du magnésium est au moins sept cents fois celui d'une bougie.

Enfin, d'après des expériences dues à M. E. Becquerel, l'arc voltaïque produit par une pile à acide azotique de 100 couples donne une lumière dont le pouvoir éclairant équivaut à celui de 1000 bougies. En plaçant une telle source de lumière à 1 mètre de distance d'un écran, la surface serait éclairée 75 fois moins que par le Soleil au zénith, environ 60 fois moins que par le Soleil à une hauteur de 30 degrés sur l'horizon. Mais cette intensité lumineuse a été de beaucoup dépassée, et MM. Fizeau et Foucault, comparant l'éclat de l'arc voltaïque à la lumière que donnait le Soleil par un ciel pur du mois d'avril, ont reconnu qu'il était seulement deux fois et demie moindre que celui de l'astre radieux. La lumière ainsi produite était celle du charbon positif traversé par le courant d'une pile que formaient trois séries de quarante-six couples Bunsen.

§ 4. PHOSPHORESCENCE.

L'incandescence, c'est-à-dire la radiation lumineuse développée par une haute température, accompagnée ou non de combinaisons chimiques, n'est pas le seul mode de production de la lumière. Les corps peuvent devenir lumineux et être visibles dans l'obscurité, dans diverses circonstances que nous allons étudier maintenant.

En 1677, un alchimiste de Hambourg du nom de Brandt découvrit, par un procédé qu'il tint d'abord secret[1], un nouveau corps doué, entre autres propriétés singulières, de la faculté d'émettre, quand il est exposé à l'air, une légère fumée qui se renouvelle continuellement : dans l'obscurité, cette vapeur est lumineuse. De là le nom de *phosphore* (de φῶς, lumière, φορός,

1. Peu d'années après Brandt, Kunckel trouva le moyen d'obtenir le phosphore. Un siècle plus tard, en 1769, Scheele montra qu'il est contenu en grande abondance dans les os de l'homme et des animaux.

qui porte) appliqué à cette substance, qui est un des soixante-six corps simples actuellement connus. Si l'on trace, avec un bâton de phosphore, des caractères quelconques sur un mur, ils apparaissent comme des traits lumineux dans l'obscurité, et ne cessent de luire qu'après la disparition complète, par combustion lente ou évaporation, de la matière phosphorée.

Bien avant la découverte de ce corps, on donnait le nom de phosphores à toutes les substances qui émettent, comme lui, de la lumière, sans accompagnement de chaleur sensible. Tels sont les bois que l'humidité a fait tomber en décomposition, les poissons de mer morts, mais non encore putréfiés, dont la

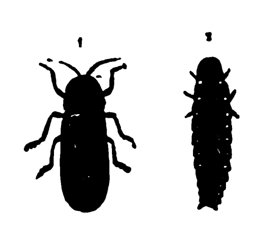


Fig. 152. — Lampyre ou ver luisant : 1, insecte mâle; 2, femelle.



Fig. 153. — Pyrophore noctiluque.

lueur se communique à l'eau elle-même quand on les agite pendant quelque temps, et enfin un grand nombre de substances minérales, quand on les soumet à des chocs ou à des frottements mécaniques, ou qu'elles ont été exposées aux rayons solaires.

C'est à cette émission de lumière, spontanée ou artificielle, que les physiciens donnent le nom de *phosphorescence*.

La phosphorescence n'est pas particulière aux matières inorganiques ou privées de vie. Quand, par une chaude soirée de juin ou de juillet, nous nous promenons dans la campagne, il n'est pas rare de voir dans l'herbe et sous les buissons une multitude de petites lueurs qui brillent comme autant d'étoiles

terrestres : ce sont les lampyres ou ***vers luisants***, genre de coléoptères dont la larve, comme l'insecte parfait, mais à un moindre degré, jouit de la propriété d'émettre une lumière d'un bleu verdâtre. Les *fulgores porte-lanterne* de la Guyane et les *cucuyos* du Mexique et du Brésil brillent, pendant la nuit, d'une lumière assez vive pour qu'il soit possible de lire avec leur seul secours. Certaines fleurs, comme les fleurs du souci, de la capucine, de la rose d'Inde, ont été considérées comme phosphorescentes; mais s'il paraît aujourd'hui prouvé qu'on s'est trompé à leur égard, il reste certain qu'une quinzaine de plantes phanérogames et huit ou neuf cryptogames ont la propriété d'émettre de la lumière ; mais c'est seulement le soir, après une journée où ces végétaux ont pu recevoir la lumière du soleil, de sorte que l'insolation paraît être, pour eux, une condition essentielle à leur phosphorescence.



Fig. 154. — Noctiluque miliaire.

La phosphorescence de la mer est produite par des myriades d'animalcules qui, comme les lampyres et les fulgores, émettent une lumière assez vive pour donner aux flots l'apparence de nappes embrasées. Ce sont tantôt des infusoires, tantôt des méduses, des astéries[1], etc., qui répandent, les unes

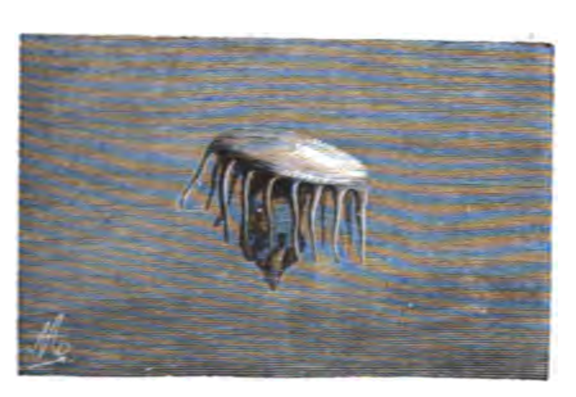


Fig. 155. — Méduse campanulaire.

1. « Le *noctiluque miliaire* est un des infusoires pélagiens qui contribuent le plus à la phosphorescence de la mer..... Il paraît, au premier abord, comme un globule de gelée transparente. Avec un grossissement un peu fort, on distingue sa forme sphérique plus ou moins régulière (fig. 154), un peu déprimée et légèrement ombiliquée en dessous..... Le noctiluque offre çà et là, dans son intérieur, des granules, probablement des germes, et des points

une lumière bleuâtre, les autres des lueurs rouges ou vertes, ou même communiquent à l'eau de la mer une teinte blanchâtre

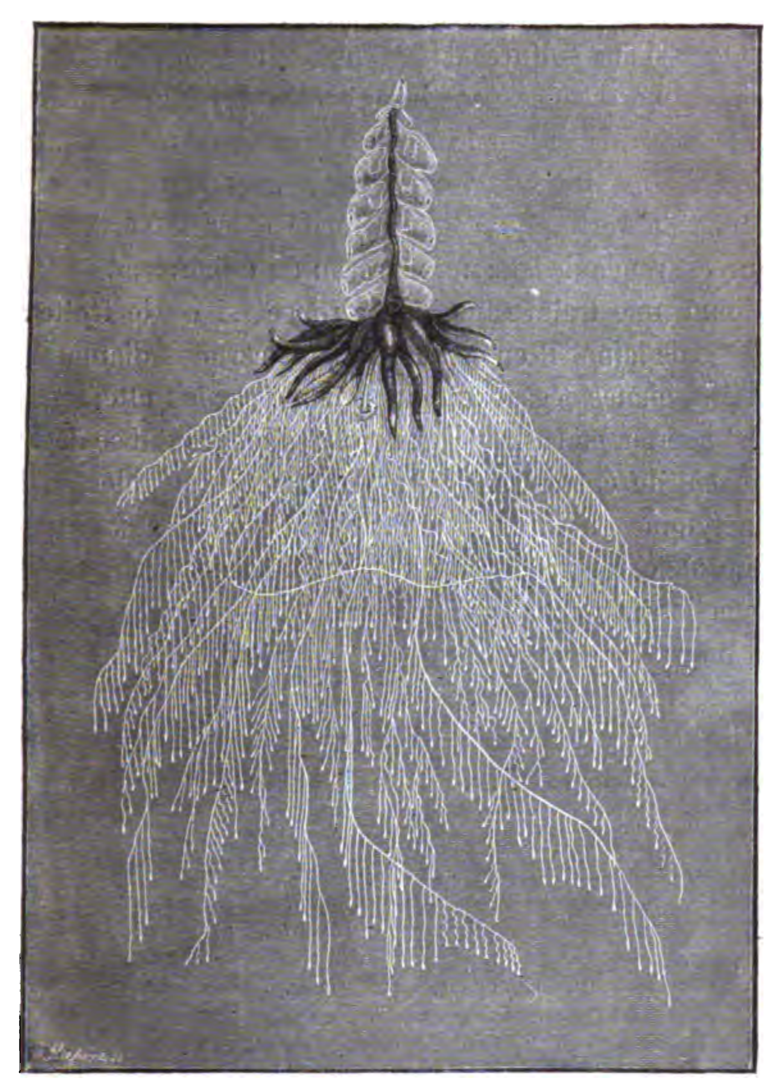


Fig. 156. — Physophore hydrostatique.

qui lui a fait donner par les marins les noms de *mer de neige* et de *mer de lait*.

lumineux. Ceux-ci paraissent et disparaissent avec rapidité : la moindre agitation détermine leur éclat. Ces points forment tout au plus la vingt-cinquième ou la trentième partie du grand diamètre du globule. Les noctiluques émaillent la surface de l'eau comme de petites constellations tombées du firmament.

« Les Infusoires, on le sait aujourd'hui, ne sont pas les seuls animaux producteurs de la

Les coquilles d'huîtres calcinées deviennent lumineuses quand elles viennent d'être exposées à la lumière du soleil : c'est au sulfure de calcium qu'est due cette propriété, qui appartient aussi aux sulfures de baryum et de strontium[1].

La phosphorescence peut encore être développée dans un grand nombre de substances par des actions mécaniques ou chimiques. Une roue de verre, frottée dans le vide au moyen d'un tube de verre, dégage une lueur assez intense, dont la couleur est rouge de feu ; un morceau du minéral appelé *dolomie* donne une traînée lumineuse rouge, si on le frotte avec une étoffe de laine. Il en est de même de certains diamants. La chaux phosphatée dégage une lueur jaune par le frottement. Qui ne s'est aperçu, en cassant du sucre, des lueurs qui se dégagent au moment du choc? On obtient des effets semblables en frottant énergiquement l'un contre l'autre deux morceaux de quartz, de craie, de chlorure de chaux ou en détachant par le clivage des lamelles de mica. Voici, d'après M. Becquerel qui cite lui-même Henri Rose, un curieux effet de phosphorescence due à un phénomène chimique de cristallisation : « Si l'on prend 2 parties d'acide arsénieux vitreux, 45 d'acide chlorhydrique ordinaire et 15 d'eau, que l'on porte le tout à l'ébullition dans

phosphorescence. Cet état brillant de la mer est encore déterminé par des Méduses, des Astéries, des Mollusques, des Néréides, des Crustacés et même des Poissons..... Ces animaux engendrent la lumière, comme la Torpille engendre l'électricité. Ils multiplient et diversifient les effets du phénomène. La lumière qu'ils produisent passe tantôt au verdâtre, tantôt au rougeâtre. A certains moments, on croit voir, dans le sombre royaume, des disques rayonnants, des plumets étoilés, des franges flamboyantes. Plusieurs animaux paraissent de loin comme des masses métalliques rougies à blanc, ou comme des bouquets de feu lançant des étincelles. Il y a des festons de verres de couleurs comparables aux guirlandes de nos illuminations publiques, et des météores incandescents allongés ou globuleux, qui se poursuivent à travers les vagues, montent, descendent, s'atteignent, se groupent, se confondent, se disjoignent, décrivent mille courbes capricieuses et s'éteignent pour se rallumer et se poursuivre de nouveau. » (*Le Monde de la mer*, par A. Frédol.)

Spallanzani a reconnu que le siège de cette propriété singulière des Méduses d'émettre de la lumière réside dans les tentacules de l'animal, dans la zone musculaire du corps et dans la cavité de l'estomac. Les autres parties du corps ne brillent que par réverbération.

1. Canton, physicien anglais, a découvert, en 1764, la phosphorescence des huitres calcinées : voilà pourquoi l'on nomme le sulfure de calcium *phosphore de Canton*. C'est à un ouvrier de Bologne, V. Carciarolo, qu'est due la découverte de la phosphorescence du sulfate de baryte calciné. De là le nom de *phosphore de Bologne* donné au sulfure de baryum.

PHOSPHORESCENCE DE LA MER

un ballon pendant dix à quinze minutes et qu'on laisse refroidir la dissolution aussi longtemps que possible, en diminuant graduellement la flamme du gaz qui sert à l'échauffer, si le ballon est placé dans l'obscurité, la cristallisation est accompagnée d'une vive lumière et la formation de chaque petit cristal est marquée par une étincelle. Si l'on agite le vase, un grand nombre de petits cristaux se forment tout à coup et en même temps il se produit beaucoup d'étincelles. Ce phénomène dure pendant tout le temps qu'il y a des cristaux à déposer, et quelquefois la dissolution refroidie est lumineuse le second jour après l'expérience. » (*La Lumière*, t. I.)

L'action de la chaleur détermine aussi la phosphorescence, et cela à une température qui est bien inférieure à celle de l'incandescence. Le spath fluor, le diamant et d'autres pierres précieuses, la craie, les sulfates de potasse et de quinine dégagent de la lumière, quand on les met en contact avec des corps chauds. Citons encore parmi les corps qui deviennent phosphorescents par l'action de la chaleur, la houille, la tourbe, la plombagine, le jayet, le soufre, le papier, les os, les dents, le corail; et, parmi les liquides, les essences de térébenthine et de citron, l'huile de pétrole, quand on les porte à la température de l'ébullition. Nous verrons plus tard que l'électricité est susceptible de produire les mêmes effets sur les corps mauvais conducteurs.

Enfin, un grand nombre de substances, d'origine soit organique, soit minérale, deviennent phosphorescentes, si on les expose quelque temps à l'action d'une vive source de lumière, par exemple à celle des rayons du soleil. L'intensité, la durée et la nuance de la lueur produite par l'insolation dépendent à la fois de la nature des substances et de leur état physique. Quant à l'influence de la source qui détermine la phosphorescence, elle varie non seulement avec l'intensité de cette source, mais aussi avec sa composition, c'est-à-dire suivant la réfrangibilité plus ou moins grande des rayons qu'elle émet elle-même. Ainsi la lumière d'une bougie peut suffire pour rendre phosphorescente le sulfure de calcium; la lumière solaire est nécessaire

pour d'autres corps; la lumière électrique, si riche en rayons chimiques, détermine la phosphorescence en un temps extrêmement court.

Georges Pouchet nous citait un cas remarquable de phosphorescence déterminée par une insolation prolongée et qui se produisait sur la plus vaste échelle. Il se trouvait en Égypte en face d'une bande de collines qui, à la lumière du soleil, avaient reflété pendant toute la journée une teinte d'un blanc jaunâtre éblouissant; au coucher de l'astre, descendu presque perpendiculairement sous l'horizon, coucher suivi d'un très court crépuscule, les collines dont il s'agit, bien que n'étant plus éclairées par la lumière solaire, conservèrent quelque temps un éclat, une illumination que nulle réflexion lumineuse ne pouvait expliquer. N'est-il pas probable que sous l'action continue d'une insolation intense et qui avait duré de longues heures, les roches dont ces collines étaient formées, étaient devenues lumineuses par phosphorescence? M. Edmond Becquerel, comme on le verra plus loin, a reconnu que certains corps soumis à l'action solaire conservaient des traces de phosphorescence plusieurs heures après l'exposition à la lumière : cette persistance est même plus grande chez les substances où la phosphorescence est développée avec une faible intensité.

Ainsi, voilà toute une série de phénomènes, dans lesquels la production de la lumière n'est ni le résultat d'une combustion vive à une haute température, ni celui d'une illumination rapide qui disparaît aussitôt que la source cesse d'être en présence de l'objet éclairé. Tous les corps que nous venons de passer en revue et que des circonstances particulières rendent phosphorescents, acquièrent, pour un temps limité il est vrai, mais souvent assez considérable, la propriété d'être lumineux par eux-mêmes, d'émettre de la lumière sensible dans l'obscurité, lumière assez forte pour éclairer les objets voisins.

Les faits étant décrits, essayons d'en indiquer les conditions déterminantes, sinon d'en faire connaître la cause.

§ 5. LA PHOSPHORESCENCE. — CONDITIONS ET CAUSES DES PHÉNOMÈNES.

La phosphorescence paraît due à des causes multiples.

Dans les êtres organisés et vivants, le mode de production de la lumière est à peu près inconnu. On sait seulement que la volonté de l'animal joue un certain rôle, qu'une température modérée est nécessaire au dégagement de la lumière, ainsi que la présence de l'oxygène. Un froid trop vif, une chaleur un peu forte la font également disparaître. Dans le phosphore, le bois pourri, les poissons morts, la production de la lumière est due sans doute à une action chimique, à une combustion lente; dans le vide en effet, toute phosphorescence cesse. Enfin, il résulte des faits exposés plus haut que l'insolation, l'élévation de température, l'électricité, et des actions mécaniques où l'électricité et la chaleur jouent sans doute un rôle, sont dans beaucoup de cas des conditions favorables au développement de la phosphorescence. Dans ces derniers temps, ce mode singulier de production de la lumière a été l'objet d'études fort intéressantes, dues à MM. Biot, Matteucci, et principalement à M. Edmond Becquerel. Nous allons les résumer rapidement.

Il a d'abord été reconnu que la phosphorescence est une propriété que peuvent acquérir momentanément un grand nombre de corps, surtout à l'état solide et à l'état gazeux : le papier, l'ambre, la soie, et une multitude d'autres matières d'origine organique; les oxydes et les sels des métaux alcalins, des métaux terreux, et de l'uranium; un grand nombre de gaz. Mais ni les autres métaux ni leurs composés n'ont pu jusqu'ici manifester la moindre trace de ce phénomène.

Les teintes de la lueur phosphorescente varient selon la nature du corps : ainsi les pierres précieuses émettent une lueur jaune ou bleue. Les sulfures de strontium, de baryum, de calcium, donnent toutes les nuances du spectre, depuis le rouge jusqu'au violet. Mais un fait singulier, mis en évidence

par M. E. Becquerel. C'est que la teinte et la vivacité de la lueur ne dépendent pas seulement de la température, mais aussi du mode de production des sulfures, et ce qui est plus singulier de l'état moléculaire des sels d'où ils ont été tirés. Ainsi, avec les divers carbonates de chaux, du spath, de la craie, etc., [illegible] par le soufre, il obtint six sulfures de calcium qui, exposés au soleil, devinrent phosphorescents, et donnèrent dans l'obscurité les teintes suivantes :

		Teinte de la lueur.
	[illegible]	Jaune orangé.
[illegible]	Craie.	Jaune.
[illegible]	Chaux de spath.	Vert.
[illegible]	Arragonite fibreuse.	Vert.
[illegible]	Marbre.	Violet rose.
	Arragonite de Vertaison.	Violet rose.

« Si l'on veut me permettre une comparaison, dit M. E. Becquerel à l'occasion de ces faits, on pourrait dire que ces derniers corps, par rapport aux effets lumineux, sont analogues aux cordes sonores auxquelles on fait rendre différents sons suivant leur état de tension. »

L'élévation de la température, nous l'avons déjà dit, accélère la phosphorescence ; mais aussi elle la fait dépenser plus vite : la lueur obtenue dure moins longtemps. Elle a aussi pour effet de modifier les teintes ; ainsi le sulfure de strontium, bleu à la température ordinaire, passe au violet-bleu, au bleu clair, au vert, au jaune, et enfin à l'orangé, quand on élève progressivement sa température de 20 degrés au-dessous de zéro à 150 degrés au-dessus.

Il était d'un grand intérêt d'étudier la manière dont les diverses radiations du spectre agissent sur les corps pour déterminer leur phosphorence, depuis les rayons chimiques situés dans la partie obscure du spectre au delà du violet jusqu'aux rayons calorifiques de la partie au delà du rouge. Pour cela, on a projeté le spectre sur des bandes recouvertes de diverses substances phosphorescentes, puis on a examiné dans l'obscu-

rité les effets lumineux produits à des distances différentes, c'est-à-dire dans les régions que déterminent les raies prismatiques. On a vu ainsi quels étaient les rayons qui produisaient les effets lumineux les plus intenses. On a trouvé que le maximum d'action dépend des corps impressionnés; mais, dans tous les cas, ce sont toujours les rayons chimiques les plus voisins du violet, les plus réfrangibles par conséquent, qui produisent la phosphorescence : les rayons calorifiques ne l'excitent point; mais ils sont doués de la propriété de continuer l'action des



Fig. 157. — Expériences de M. E. Becquerel sur la phosphorescence produite par la lumière électrique.

rayons chimiques. Ces résultats expliquent à merveille la faible action de la flamme des bougies ou du gaz pour produire la phosphorescence des corps, et au contraire l'efficacité de la lumière électrique : cette dernière source abonde en rayons chimiques ou ultra-violets, tandis que les premières, riches en rayons de chaleur, sont très pauvres au contraire en rayons chimiques. On voit dans la figure 157 la disposition adoptée par M. E. Becquerel pour l'étude de cette action de la lumière électrique. Les diverses matières phosphorescentes sont renfermées dans une série de tubes de Geissler disposés dans le même circuit. Quand le courant de la bobine d'induction passe

à travers les tubes, les diverses substances s'illuminent, prennent chacune une coloration spéciale, et il est facile de comparer en même temps les durées relatives de l'illumination pour chacune d'elles. La lumière si vive du magnésium rivalise, comme l'a montré M. Le Roux, avec la lumière électrique. Il suffit d'allumer un fil de ce métal en présence d'un tube renfermant par exemple du sulfure de calcium, pour obtenir

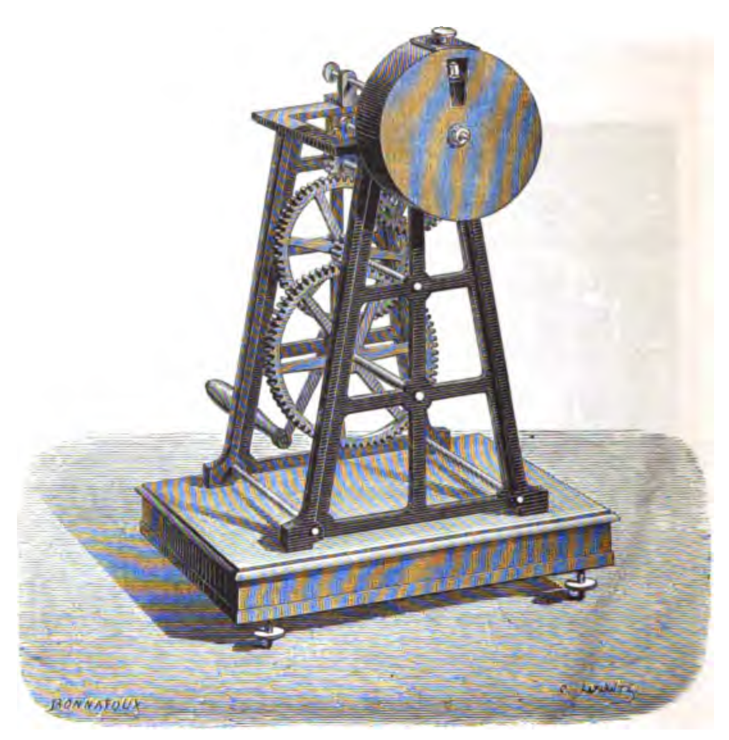


Fig. 158. — Phosphoroscope de M. E. Becquerel.

une phosphorescence prolongée de cette substance, ainsi qu'on le constate en portant le tube dans l'obscurité.

M. Edmond Becquerel a imaginé, pour l'étude de ces phénomènes, un instrument qu'il nomme *phosphoroscope*, et dont voici la description sommaire : Deux disques noircis sont percés chacun de quatre ouvertures en forme de secteurs et peuvent tourner autour d'un axe commun ; mais comme les ouvertures de l'un ne correspondent pas aux ouvertures de l'autre, il en résulte qu'un rayon de lumière ne peut jamais traverser

le système des deux disques, quelle que soit d'ailleurs la vitesse de rotation. Ils sont l'un et l'autre enfermés dans une boîte noircie qui reste immobile et dans les parois de laquelle sont pratiquées deux ouvertures. La lumière solaire arrive par l'une d'elles, frappe le corps dont on veut étudier la phosphorescence et qui est fixé entre les deux disques dans l'axe des fenêtres extérieures de la boîte; mais, comme nous venons de le dire, elle ne peut traverser de l'autre côté. La lueur phosphorescente provoquée dans le corps passe, au contraire, par l'ouverture opposée, toutes les fois que le mouvement de rotation amène l'une des fenêtres mobiles en face de l'ouverture extérieure.

L'action de la lumière sur le corps se reproduit ainsi quatre fois à chaque tour : si la vitesse est suffisante, la phosphorescence produite est continue, et la sensation produite dans l'œil de l'observateur l'est pareillement.

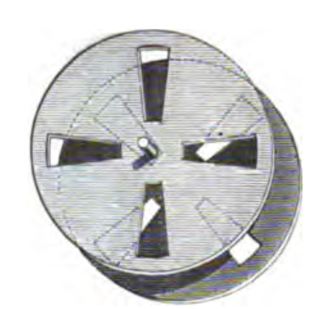


Fig. 159. — Disques du phosphoroscope.

Le phosphoroscope ainsi construit laisse arriver au corps qu'on observe une quantité de lumière constante, quelle que soit la vitesse de rotation; il en est de même pour la quantité de lumière phosphorescente qui arrive à l'œil; mais la durée de l'action continue de la lumière sur le corps varie avec cette vitesse, puisqu'elle est égale au temps qu'une ouverture met à passer devant lui; cette durée se mesure d'ailleurs aisément, quand on connaît les dimensions de l'ouverture et le nombre des tours que fait en une seconde le système des deux disques mobiles. En résumé, plus la rotation est rapide, plus est petite la durée de l'action de la lumière, mais aussi plus les interruptions dans cette action sont courtes, de sorte qu'il doit y avoir une certaine vitesse pour laquelle on obtient le maximum d'éclat.

A l'aide du phosphoroscope, M. Becquerel, outre les résultats que nous avons déjà indiqués plus haut, a pu constater

dans certains corps des émissions lumineuses dont la durée est excessivement faible, puisqu'elle ne dépasse pas la dix-millième partie d'une seconde. D'autres, comme les sulfures verts de strontium et de calcium, restent phosphorescents pendant trente-six heures. Le diamant luit pendant plusieurs heures. Enfin, il a pu étudier la loi suivant laquelle les corps phosphorescents perdent leur lumière par émissions successives.

La lumière émise par divers végétaux et animaux phosphorescents a été soumise à l'analyse spectrale ; on a trouvé que les spectres de ces lumières sont continus, qu'on n'y peut distinguer ni raies obscures ni raies brillantes.

§ 6. PHÉNOMÈNES DE FLUORESCENCE.

Si l'on dispose à l'intérieur d'une chambre obscure une auge en verre remplie d'une dissolution de bisulfate de quinine, et si l'on projette sur l'une des faces du vase un faisceau de lumière solaire, ce faisceau F traverse le liquide sans perdre de sa force, F'. La lumière vue par transmission reste blanche et la solution de quinine paraît tout à fait incolore. Toutefois la face antérieure AB*ab*, celle sur laquelle tombe le faisceau lumineux, a pris une belle teinte d'azur, qu'elle renvoie par diffusion dans tous les sens. C'est à sir John Herschel qu'on doit la première observation de ce phénomène, qui a été constaté ensuite dans un assez grand nombre de substances.

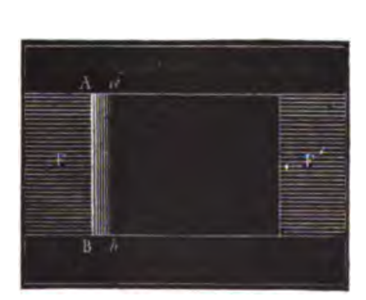


Fig. 160. — Fluorescence du sulfate de quinine.

Par exemple, si l'on projette à la surface d'un vase plein d'eau quelques fragments d'écorce fraîche de marronnier d'Inde, et qu'on expose le vase à la lumière du soleil, on voit

bientôt des courants bleuâtres d'une teinte assez vive, descendre de chaque fragment et peu à peu remplir tout le liquide. L'expérience est plus frappante quand on la fait dans la chambre obscure, et qu'on reçoit le faisceau à l'aide d'une lentille adaptée à l'ouverture de la chambre, après lui avoir fait préalablement traverser un écran en verre violet. « L'esculine que renferme l'écorce, dit M. E. Becquerel, commence à se dissoudre dans

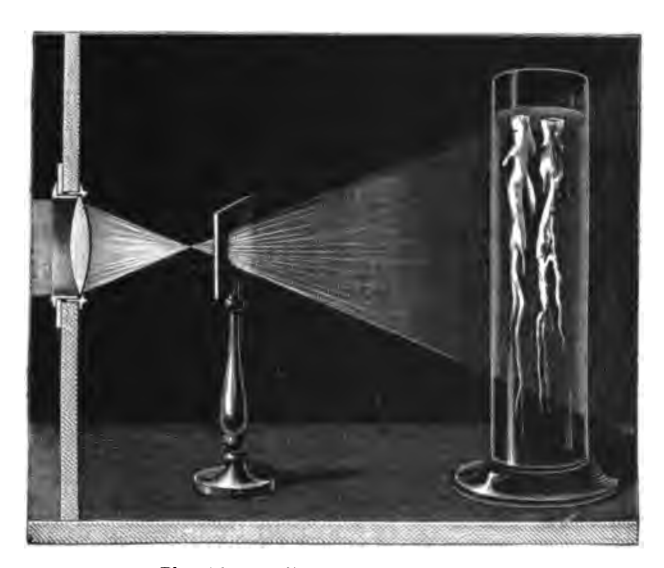


Fig. 161. — Fluorescence de l'esculine.

l'eau, et l'on voit aussitôt des traînées bleuâtres assez vivement lumineuses, qui accusent la présence de cette matière, descendre verticalement dans l'eau, dont la teinte est plus sombre et dont la couleur est violet foncé comme celle du faisceau des rayons incidents. Si au bout de quelques instants on agite l'eau, l'esculine se mélange à toutes les couches, et le vase entier prend la teinte bleue. »

Parmi les substances liquides qui jouissent de cette propriété de s'illuminer à la surface, citons encore les solutions alcooliques de chlorophylle, d'orseille, de tournesol, de datura stramonium. Certains corps solides transparents, le verre d'urane, le spath fluor, sont dans le même cas. C'est en étudiant sur ce dernier corps la phosphorescence spéciale dont il vient d'être

question, qu'un physicien anglais, M. Stokes, a donné à l'ensemble de ces phénomènes le nom de *fluorescence*.

Le spath fluor (chaux fluatée ou fluorine) se trouve fréquemment dans les filons métallifères, sous la forme de beaux cristaux cubiques, tantôt réguliers, tantôt à faces octaédriques. Exposés aux rayons solaires dans la chambre obscure, ils se colorent d'une vive lumière répandue en couche mince à la surface, et dont la teinte varie avec les échantillons : violette, bleuâtre, bleu-verdâtre, rose[1].

On a vu plus haut que J. Herschel avait reconnu que la lumière qui avait pénétré dans la solution de sulfate de quinine ne perdait point de sa force, et que la solution restait transparente et incolore. Mais il constata aussi un fait très important, qui est général dans les phénomènes de fluorescence. Ayant disposé à la suite l'une de l'autre deux cuves remplies du même liquide fluorescent, il trouva que le faisceau, après son passage dans le premier milieu, avait perdu le pouvoir de provoquer la fluorescence dans le liquide du second vase. On met en évidence cette propriété curieuse de la façon suivante : Un tube TT' (fig. 162) plein de la solution de quinine devient lumineux tout le long de la face ou de l'arête exposée aux rayons solaires. On le plonge dans la cuve pleine du même liquide et aussitôt toute la partie immergée du tube perd sa lumière, tandis que la face AB de la cuve placée en avant s'illumine elle-même. On observerait le même phénomène avec deux cristaux de fluorine dont l'un serait disposé à la suite de l'autre.

On fait, dans les cours de physique, une expérience curieuse qui consiste à tracer un dessin quelconque sur une feuille de papier, à l'aide d'un pinceau imbibé de sulfate de quinine. Exposé à la lumière blanche, le dessin se voit à peine. Mais si l'on interpose, entre le faisceau de lumière et la feuille, un

1. Le spath fluor, qui a donné son nom aux phénomènes de fluorescence, devient aussi lumineux par la chaleur. En le réduisant en poudre et en projetant cette poussière blanche sur une feuille de tôle chauffée au-dessous du rouge naissant, elle émet une lumière qui va du rose au violet et au blanc.

verre de couleur violet foncé, toutes les parties du papier qui n'ont pas été recouvertes de sulfate de quinine restent obscures, tandis que les lignes du dessin brillent d'une belle lueur bleuâtre. L'effet est plus saisissant encore, si l'on opère avec la lumière électrique.

Comment interpréter ces phénomènes?

Pour cela, faisons remarquer d'abord qu'il n'y a pas d'absorption sensible de la lumière, puisque le faisceau incident conserve, lorsqu'il émerge des substances fluorescentes, l'intensité et la couleur qu'il avait auparavant. L'absorption ne portant point sur les radiations lumineuses, il s'agissait de voir si le phénomène ne provient pas de l'absorption des radiations chimiques, et en effet l'analyse spectrale a démontré qu'il en est ainsi.

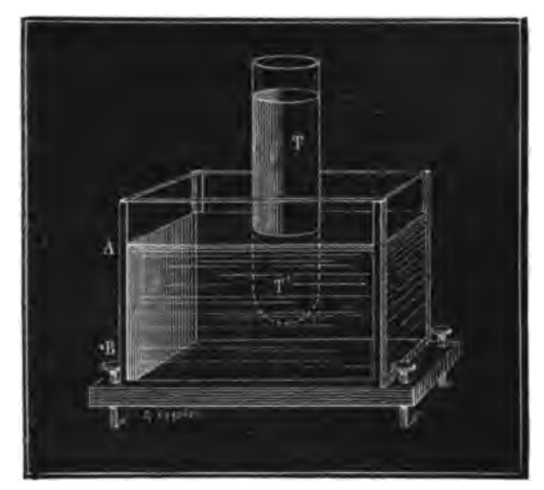


Fig. 162. — Expérience prouvant que le pouvoir de déterminer la fluorescence est limité.

D'autre part, la lumière fluorescente analysée au prisme a donné, pour la plupart des substances, des spectres constitués de la même manière que ceux de la lumière du faisceau incident. Ainsi la lumière diffusée par le bisulfate de quinine, l'esculine, la fluorine est composée de toutes les radiations du rouge au violet. Le verre d'urane, la chlorophylle toutefois donnent des spectres formés de raies brillantes séparées par des bandes sombres.

Mais une loi générale démontrée par les expériences de M. Stokes est celle-ci : les rayons qui, par leur action sur les substances fluorescentes, déterminent la production de lumière, ont une réfrangibilité plus forte que celle des rayons de cette

lumière spéciale. En général, ce sont les radiations chimiques qui sont absorbées par la substance fluorescente, puis transformées en radiations lumineuses.

§ 7. TRANSFORMATION DES RADIATIONS. — CALORESCENCE.

Il résulte des faits que nous venons de décrire dans ce paragraphe et dans les précédents, que la lumière peut être produite dans certains corps sans que ces corps atteignent la température nécessaire pour l'incandescence, et sans qu'il y ait intervention des phénomènes chimiques qui accompagnent la combustion. Le caractère commun de la phosphorescence comme de la fluorescence, c'est que l'un et l'autre des phénomènes sont dus à la transformation de certaines des radiations d'une source. Une partie de la force vive des ondes émanées de la source est absorbée; elle donne lieu à une radiation nouvelle composée de vibrations moins rapides, dont la longueur d'onde est plus grande; en un mot, par cette transformation, des radiations généralement invisibles, appartenant à la partie chimique du spectre, sont devenues visibles.

Le problème inverse, qui consisterait à transformer des radiations moins réfrangibles en radiations plus réfrangibles, est-il possible? C'est une question que l'on s'était posée et qu'un physicien anglais, M. Tyndall, a résolue de la manière suivante. Ce savant a utilisé dans ce but la propriété que possède une dissolution concentrée d'iode dans le sulfure de carbone d'absorber à peu près complètement les rayons lumineux et de transmettre au contraire presque complètement les rayons de la partie infra-rouge du spectre.

En remplissant un ballon de cette solution, on constate aisément que la couleur d'un violet foncé de la masse liquide intercepte la lumière, au point que l'œil n'y saisit aucune trace lumineuse, tandis qu'en plaçant au foyer de cette sorte de lentille de l'amadou, du papier, de la poudre, les rayons calori-

fiques obscurs ainsi concentrés déterminent l'incandescence (fig. 163).

Pour source rayonnante, Tyndall adoptait l'arc voltaïque produit entre les cônes de charbon d'un régulateur photo-électrique. Ces pointes de charbon étaient placées à l'intérieur d'une chambre en étain, en coïncidence avec le foyer d'un miroir concave qui renvoyait le faisceau lumineux sur un ballon rempli de la solution iodée de sulfure de carbone. En employant un ballon de 17 centimètres de diamètre, il a vu du papier noir s'enflammer au foyer du ballon et une lame de platine platiné s'échauffer au rouge; avec un ballon de 8 centimètres le platine fut porté au rouge clair; il fut chauffé à blanc avec un ballon plus petit. Décrivons d'après Tyndall lui-même les effets produits au foyer conjugué du miroir, lorsque le faisceau convergent de lumière électrique traverse un vase contenant la solution d'iode sous une épaisseur de 6 centimètres. « La chaleur du foyer, dit-il, est excessivement forte..... Des feuilles noircies de plomb et d'étain peuvent s'y fondre; un épais morceau de métal fusible y est promptement percé et fondu. Une feuille de zinc noircie placée au foyer s'enflamme; et, en faisant passer lentement la feuille à travers le foyer, on peut maintenir son état d'ignition jusqu'à ce qu'elle soit entièrement consumée. Un fil de magnésium,

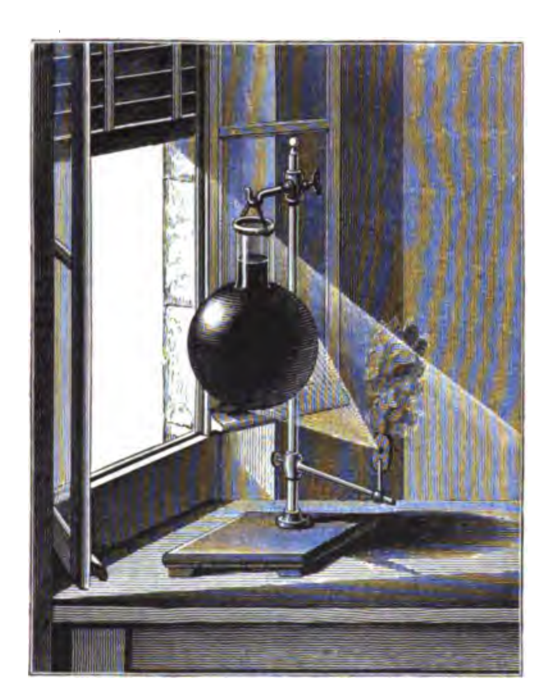


Fig. 163. — Séparation des radiations lumineuses et des radiations calorifiques par le sulfure de carbone iodé.

aplati à son extrémité et noirci, s'enflamme aussi et brûle avec un vif éclat. Un cigare s'allume instantanément au foyer obscur.»

Toutefois, dans ces différents cas, Tyndall remarque que « les corps exposés aux rayons invisibles étaient plus ou moins combustibles. Leur vif éclat, dû en grande partie à la combustion, à l'action de l'oxygène de l'atmosphère, ne prouvait pas

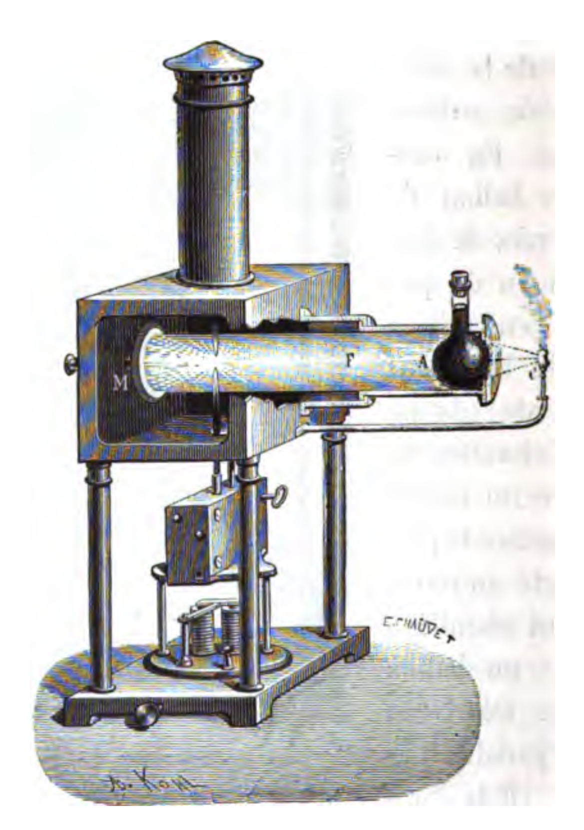


Fig. 164. — Expérience de Tyndall. Phénomène de calorescence.

d'une manière concluante que la réfrangibilité des rayons se fût élevée. » Pour mettre cette élévation en évidence, il fit des expériences analogues sur des corps non combustibles ou sur des corps combustibles placés dans un espace privé d'oxygène. « J'ai élevé bien souvent, dit-il, à la chaleur blanche des feuilles de platine platiné, soit dans l'air, soit dans le vide. Vu à travers un prisme de sulfure de carbone, le platine chauffé à blanc donne un spectre riche et complet. Toutes les couleurs, du rouge

au violet, brillent d'un éclat extrêmement vif. Les ondes d'où provenaient primitivement ces couleurs n'avaient ni rayons visibles, ni rayons ultra-violets mêlés avec elles ; elles étaient exclusivement extra-rouges. L'action des atomes de platine les fait passer de l'état de rayons de chaleur à celui de rayons de lumière. Les rayons frappent le platine en vibrant d'une certaine manière ; ils le quittent en vibrant plus rapidement. Ainsi leur réfrangibilité s'est élevée : les rayons invisibles ont été rendus visibles. Pour exprimer cette transformation des rayons de chaleur en d'autres rayons d'un degré plus élevé de réfrangibilité, je proposerai le terme de *calorescence*. Il s'harmonise bien avec le terme de *fluorescence* introduit par M. le professeur Stokes, et il indique aussi la nature des effets auxquels il s'applique. »

§ 8. DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR ABSORPTION.

Nous avons vu que les corps solides, liquides, ou gazeux, considérés comme des milieux pour la lumière, se divisent en corps *opaques* et en corps *transparents* ou *translucides*. Les premiers ne se laissent point traverser par la lumière, qui, en arrivant à leur surface, est réfléchie ou diffusée, c'est-à-dire renvoyée dans le milieu d'où elle arrive ; les autres, au contraire, transmettent la lumière qui pénètre en plus ou moins grande quantité dans l'intérieur du nouveau milieu.

Y a-t-il des corps qui soient doués de l'opacité absolue ? En est-il qui jouissent d'une absolue transparence ? Non. Si les métaux, par exemple, interceptent complètement la lumière, c'est qu'ils sont employés sous une certaine épaisseur. Une expérience déjà ancienne (elle est due à Newton) prouve que le plus dense des métaux après le platine, l'or, laisse passer une certaine quantité de lumière ; il suffit pour cela qu'il soit réduit en feuilles extrêmement minces. En collant sur une lame de verre une feuille d'or telle que les batteurs la produisent, et en

regardant au travers la lumière d'une bougie ou celle du ciel, on perçoit une lueur de teinte bleu-verdâtre très sensible. Cette coloration de la lumière transmise démontre que celle-ci ne provient pas d'une fente existant dans la feuille de métal, mais a bien réellement traversé la substance même de l'or. L'argent, réduit pareillement en feuilles excessivement minces, laisse passer une lumière verte. Il en est de même pour beaucoup d'autres matières, qui semblent opaques et le sont en effet sous une certaine épaisseur, mais qui deviennent translucides dès qu'elles sont réduites en lames suffisamment minces. C'est le cas de la plupart des très petits objets qu'on examine sur le porte-objet du microscope ; leur extrême ténuité les rend visibles par transparence : infusoires, cellules végétales, substances minérales diverses.

De même, les milieux qui semblent doués de la plus grande transparence absorbent en réalité une partie de la lumière qui les pénètre. L'eau la plus pure, en couche mince, semble absolument limpide ; les objets vus au travers conservent leur éclat et paraissent aussi lumineux et distincts que si la couche liquide n'existait pas ; cette propriété est encore bien plus sensible pour l'air. Cependant, dès que l'eau la plus limpide et la plus pure a une certaine profondeur, sa transparence diminue, et bientôt l'absorption de la lumière devient extrêmement sensible ; d'une part, les objets vus au travers de l'eau sont de moins en moins distincts jusqu'à devenir invisibles ; d'autre part, ils prennent une coloration qui est celle de l'eau elle-même vue par diffusion. Quant à la lumière transmise, outre la diminution d'intensité qu'elle a subie par son passage dans le liquide, elle a pris une teinte qui est généralement différente de celle qu'elle présente à la réflexion.

Ainsi les radiations lumineuses, en traversant les milieux doués d'une transparence relative, s'éteignent ou sont en partie absorbées. En quoi consiste cette absorption et comment varie-t-elle selon la nature des substances, leur épaisseur, etc. ?

La lumière consistant en un mouvement ondulatoire, en un

mélange d'un certain nombre de vibrations qui diffèrent par leurs périodes, comme le prouve la différence de réfrangibilité de ses divers rayons, le mouvement qui la constitue ne peut être détruit : c'est une conséquence de ce qu'on nomme en mécanique le principe de la *conservation des forces vives*[1]. Ce mouvement, qui n'est pas anéanti, est donc simplement transformé. Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons décrit déjà divers modes de cette transformation. Nous avons vu que certaines radiations se changent en chaleur, c'est-à-dire en vibrations moins rapides ; d'autres substances ont la propriété de transformer des radiations lumineuses ou chimiques en d'autres radiations moins réfrangibles, mais cependant visibles encore, et les phénomènes de phosphorescence et de fluorescence correspondent à ces changements.

Décrivons quelques-uns des phénomènes qui caractérisent l'absorption de la lumière par divers milieux.

Un milieu est incolore lorsqu'il laisse passer tous les rayons colorés du spectre de A en H, ou du moins lorsqu'il les affaiblit tous dans la même proportion. Le verre, le sel gemme, l'eau, l'air sont dans ce cas, à moins de très grandes épaisseurs, pour lesquelles, l'absorption inégale de certaines radiations devenant sensible, les milieux prennent la couleur qui résulte de la transmission des radiations non absorbées. Il sera question plus loin de cette coloration pour l'eau et l'air. Quant au sel gemme, il offre cette particularité qu'il laisse également passer les rayons de la partie obscure du spectre et ceux de la partie chimique.

1. Citons ce que dit A. Fresnel sur ce point : « Les corps noirs, et même les surfaces métalliques les plus brillantes, ne réfléchissent pas à beaucoup près la totalité de la lumière qui tombe sur leur surface : les corps imparfaitement transparents, et même les plus diaphanes, quand ils sont assez épais, absorbent aussi (pour me servir de l'expression usitée) une quantité notable de lumière incidente ; mais il n'en faut pas conclure que le principe de la conservation des forces vives n'est plus applicable à ces phénomènes; il résulte au contraire de l'idée la plus probable qu'on puisse se faire sur la constitution mécanique des corps, que la somme des forces vives doit toujours rester la même (tant que les forces accélératrices qui tendent à ramener les molécules à leur position d'équilibre n'ont pas changé d'intensité), et que la quantité de forces vives qui disparait comme lumière est reproduite en chaleur. » (De la Lumière, *Supplément à la traduction française de la Chimie de Thompson.*)

Il est à remarquer que les corps *noirs*, qui éteignent les rayons lumineux de toutes couleurs, absorbent aussi les rayons ultra-violets, tandis qu'ils laissent passer les radiations calorifiques obscures : le sel gemme, le quartz, l'alun noircis ou enfumés sont dans ce cas. Nous avons vu que la solution d'iode dans le sulfure de carbone, qui est rouge en lame mince, éteint à peu près complètement la lumière solaire sous une épaisseur d'un ou deux décimètres ; mais elle reste transparente pour les radiations de chaleur.

Entre les milieux diaphanes et incolores, et les corps noirs qui interceptent la lumière, se placent les corps transparents colorés, qui absorbent inégalement les divers rayons du spectre, et dont la coloration varie quelquefois totalement avec l'épaisseur, et d'autres fois avec la température.

L'étude des spectres de la lumière qui a traversé de tels milieux, permet de mesurer l'absorption des diverses radiations et de voir par quel concours de rayons le milieu prend la teinte qui le caractérise. Pour observer l'influence de l'épaisseur, on donne à la matière colorée la forme d'un prisme à angle aigu, de sorte que, du sommet à la base, l'épaisseur aille en variant d'une manière progressive. Non seulement il arrive que la couleur des substances se fonce à mesure que l'épaisseur augmente, mais aussi que certaines changent ainsi totalement de couleur : c'est le phénomène connu sous le nom de *dichroïsme* ou de *polychroïsme*. Un savant anglais, M. Gladstone, a étudié d'une manière fort ingénieuse l'influence de l'épaisseur sur la couleur des milieux et les spectres d'absorption qui rendent raison, à la seule inspection de leur forme, des changements de couleur qui en résultent. Voici, d'après M. G. Salet (*Dictionnaire de Chimie* de Wurtz), comment a procédé M. Gladstone, par exemple pour les sels colorés tels que le chlorure de chrome, le permanganate de potasse, le chlorure de cobalt. « Il emplit un prisme creux en cristal de la solution à examiner, puis il regarde, à l'aide d'un prisme de verre, une fente très étroite et très lumineuse, disposée derrière le prisme creux et perpendi-

culairement à ses arêtes principales. Par cette disposition les rayons transmis par les différents points de la fente ont à traverser des épaisseurs croissantes de liquide, depuis une épaisseur négligeable, jusqu'à celle qui suffit pour intercepter presque toute lumière. » Nous reproduisons ici (fig. 165 à 168) divers spectres obtenus par cette méthode d'observation.

L'étude des spectres d'absorption est également intéressante pour les chimistes, en ce que ces spectres sont le plus souvent caractéristiques de la substance étudiée. Prenons la matière colorante du sang pour exemple. « Lorsqu'on mêle, dit M. Buignet (*Manipulations de physique*), une ou deux gouttes de ce liquide



Fig. 165. — Spectre d'absorption du permanganate de potasse.



Fig. 166. — Spectre d'absorption du chlorure de chrome.



Fig. 167. — Spectre d'absorption du chlorure de cobalt concentré.



Fig. 168. — Spectre d'absorption du chlorure de cobalt étendu.

avec 4 ou 5 grammes d'eau, et qu'après avoir introduit le mélange dans une petite cuve de verre à faces parallèles, on place celle-ci devant les collimateurs du spectroscope, on reconnaît dans le spectre produit deux larges bandes obscures, dont la position (fig. 169, 1) est constante et invariable. Toutes deux sont situées entre les raies D et E; mais l'une est dans le jaune et l'autre dans le vert... Cette propriété de fournir deux bandes d'absorption disposées comme il vient d'être dit appartient à l'*hémoglobine* ou globule sanguin combiné à l'oxygène. D'après Hope Seyler, un liquide qui ne renferme que 0,0001 d'hémoglobine, examiné sous une épaisseur de $0^m,01$, présente encore nettement les deux bandes. » La figure 169 (2, 3) montre les

altérations que subit le spectre de l'hémoglobine lorsque cette substance est réduite par le tartrate d'étain ammoniacal, ou combinée à l'oxyde de carbone. Les deux autres spectres sont ceux de l'hématine, matière colorante qu'on obtient en soumettant l'hémoglobine à l'action des acides ou des alcalis.

« On pourrait craindre, ajoute M. Buignet, en se basant uniquement sur le procédé spectroscopique, de confondre l'hémoglobine du sang avec certaines matières colorantes rouges ou violacées : l'expérience montre qu'il n'en est rien. Le *suc de cerises*, les infusions de *rose trémière*, de *myrtil*, de *bois de Brésil*, de *garance*, le *vin rouge*, les couleurs d'*aniline*, les *acétates*, *hyposulfites*, *méconates* et *sulfocyanures ferriques*, produisent bien des changements dans l'aspect du spectre ; mais en aucun cas les bandes d'absorption ne peuvent être confondues avec celles du sang. La *cochenille*, il est vrai, quand elle est en solution ammoniacale, donne deux bandes qu'un examen superficiel pourrait faire confondre avec celles du sang ; mais la position de ces bandes n'est pas la même, et le sulfure d'ammonium n'y fait point apparaître la bande de Stokes. Il y a donc de fortes présomptions pour croire qu'on a affaire à une tache de sang, toutes les fois que le liquide observé au spectroscope forme deux bandes d'absorption comprises entre les raies D et E, et que ces deux bandes disparaissent sous l'action du sulfure d'ammonium, pour faire place à une bande unique située dans l'espace clair qu'elles laissaient

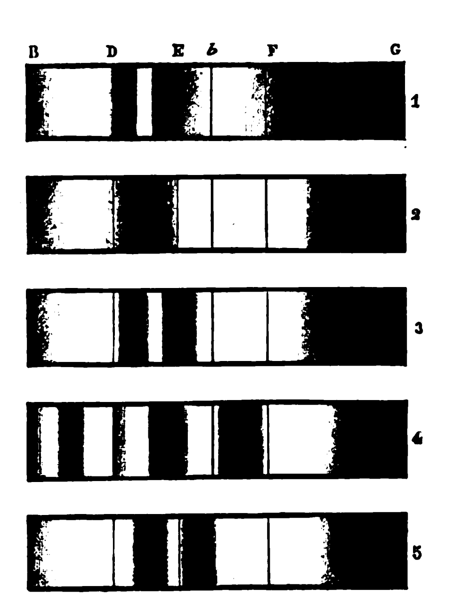


Fig. 169. — Spectres d'absorption : 1, de l'hémoglobine libre ; 2, de l'hémoglobine réduite par le tartrate d'étain ; 3, de l'hémoglobine combinée à l'oxyde de carbone ; 4, de l'hématine en solution acide ; 5, de l'hématine réduite par le tartrate d'étain.

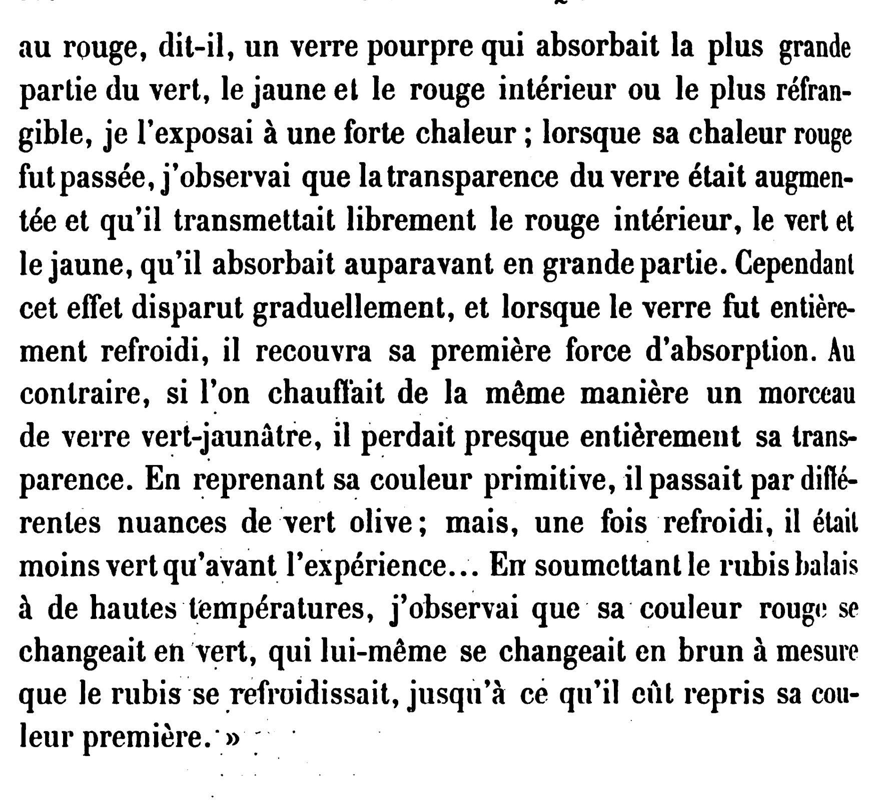
entre elles... On ne peut méconnaître, dit en terminant l'auteur que nous citons, l'importance que ces faits présentent au point de vue de la constatation des taches de sang en chimie légale. »

Revenons aux phénomènes de coloration dus à l'absorption inégale des rayons colorés de la lumière blanche, quand elle traverse certains milieux.

Prenons un verre rouge, dont la coloration est due au protoxyde de cuivre. Si l'on examine le spectre de la lumière qui traverse une lame de ce verre, on voit qu'il se réduit à la partie rouge; les bandes sombres dont les autres parties du spectre sont recouvertes indiquent les couleurs qui ont été le plus absorbées. Dans un verre pourpre, c'est la partie rouge et la partie violette qui domine; le vert et les couleurs voisines sont le plus absorbées. La couleur des sels de nickel et des verres verts est due à l'absorption des couleurs extrêmes du spectre, dans le rouge et le violet; avec une épaisseur croissante, le vert prédomine de plus en plus et finit par rester seul.

Comme exemples de dichroïsme provenant de la variation des parties du spectre absorbées à mesure que varie l'épaisseur, citons le vin vieux, l'eau-de-vie vieille, l'infusion de safran, le verre jaune, etc., qui sont jaunes sous une faible épaisseur et dont la teinte passe au rouge et au brun-rouge, à mesure que la lumière traverse des épaisseurs croissantes de ces milieux. Les sels de chrome et de manganèse laissent passer deux sortes de rayons et leurs spectres ont deux maxima, l'un dans le rouge, l'autre dans le vert; quand l'épaisseur augmente, le rouge l'emporte et la teinte devient livide et rougeâtre. Le bleu de cobalt ou verre d'azur, qui, sous une faible épaisseur, offre la couleur par laquelle on le désigne, devient de plus en plus rouge à mesure que cette épaisseur augmente.

Le docteur Brewster a fait d'intéressantes expériences relatives à l'influence de la chaleur sur la force d'absorption des milieux colorés. Il a reconnu que cette influence agit différemment selon les substances, diminuant l'absorption chez les unes, l'augmentant au contraire chez les autres. « Ayant chauffé



au rouge, dit-il, un verre pourpre qui absorbait la plus grande partie du vert, le jaune et le rouge intérieur ou le plus réfrangible, je l'exposai à une forte chaleur ; lorsque sa chaleur rouge fut passée, j'observai que la transparence du verre était augmentée et qu'il transmettait librement le rouge intérieur, le vert et le jaune, qu'il absorbait auparavant en grande partie. Cependant cet effet disparut graduellement, et lorsque le verre fut entièrement refroidi, il recouvra sa première force d'absorption. Au contraire, si l'on chauffait de la même manière un morceau de verre vert-jaunâtre, il perdait presque entièrement sa transparence. En reprenant sa couleur primitive, il passait par différentes nuances de vert olive; mais, une fois refroidi, il était moins vert qu'avant l'expérience... En soumettant le rubis balais à de hautes températures, j'observai que sa couleur rouge se changeait en vert, qui lui-même se changeait en brun à mesure que le rubis se refroidissait, jusqu'à ce qu'il eût repris sa couleur première. »

CHAPITRE XI

QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE?

§ 1. ANCIENNES HYPOTHÈSES SUR LA NATURE DE LA LUMIÈRE.

Nous nous sommes borné jusqu'à présent à décrire les phénomènes lumineux et quelques-unes de leurs lois, sans faire intervenir dans l'explication des faits aucune hypothèse sur la nature de la lumière. Dès le début toutefois, nous avons laissé entrevoir que la lumière consiste, comme le son, en vibrations très rapides des molécules des sources, vibrations qui se communiquent à un milieu spécial et s'y propagent sous la forme d'ondulations avec une vitesse considérable. Le moment est venu d'expliquer plus complètement la théorie, sans laquelle les phénomènes qui nous restent à décrire paraîtraient le plus souvent inexplicables.

Commençons par résumer sommairement les anciennes hypothèses sur la lumière, hypothèses aujourd'hui généralement abandonnées.

Les anciens n'avaient à cet égard, comme sur les autres phénomènes physiques, que les idées les plus erronées ou les notions les plus vagues. Que dire de la façon dont l'école pythagoricienne expliquait la lumière, ou plutôt la vision ? Suivant les philosophes de cette école, « l'œil projette hors de lui une infinité de rayons qui, comme autant de bras invisibles, vont tâter et saisir les objets perçus : de là l'image visuelle de ces objets. Démocrite et les Épicuréens établirent une théorie tout

opposée, qui a fini par l'emporter. D'après cette théorie, les images qui se forment dans l'œil sont, au contraire, une émanation des objets. Platon essaya de concilier les deux théories, en expliquant la vision par la rencontre des rayons partant de l'œil avec les rayons émanant de l'objet. » (Hœfer, *Histoire de la Physique*.) En quoi consistait cette double émanation, et comment la sensation de la lumière pouvait-elle résulter de la rencontre de rayons qui se choquaient hors de l'œil? Il est bien difficile de se rendre compte de la pensée qui avait suggéré de telles hypothèses.

L'opinion d'Aristote n'est pas moins singulière. Ce grand philosophe « expliquait la nature de la lumière en supposant qu'il y a des corps transparents par eux-mêmes, par exemple, l'air, l'eau, la glace, etc., c'est-à-dire des corps qui ont la propriété de rendre visibles ceux qui sont derrière eux; mais comme dans la nuit nous ne voyons rien au travers de ces corps, il ajoute qu'ils ne sont transparents que potentiellement ou en puissance, et que dans le jour ils le deviennent réellement et actuellement; et d'autant qu'il n'y a que la présence de la lumière qui puisse réduire cette puissance en acte, il définit par cette raison *la lumière l'acte du corps transparent considéré comme tel*. Il ajoute que la lumière n'est point le feu ni aucune autre chose corporelle qui rayonne du corps lumineux, et se transmet à travers le feu, ou de quelque autre corps lumineux, au corps transparent. » (*Encyclopédie*.)

Il faut arriver jusqu'aux temps modernes, où la méthode d'observation expérimentale a été sérieusement inaugurée, pour rencontrer, en ce qui touche la question posée en tête de ce chapitre, autre chose que des vues purement spéculatives, c'est-à-dire pour trouver des hypothèses véritablement scientifiques. Nous ne passerons pas en revue toutes celles qui ont été proposées; toutes d'ailleurs se ramènent plus ou moins à deux théories principales : la théorie de l'*émission* et celle des *ondulations*. Commençons par l'exposé de la première, qu'on nomme aussi *théorie de l'émanation*.

§ 2. THÉORIE DE L'ÉMISSION.

Suivant Newton, qui a le premier réduit en système la théorie de l'émission, la lumière serait formée de molécules matérielles d'une excessive ténuité, que les sources lumineuses émettent à tout instant, et qu'elles projettent dans l'espace avec une vitesse uniforme : c'est le choc de ces projectiles sur la rétine qui, ébranlant les nerfs optiques, déterminerait la sensation de la lumière. Ces particules, quand leur mouvement les amène dans le voisinage des molécules des corps, sont soumises à l'action de forces tantôt attractives, tantôt répulsives, qui produisent : les forces attractives la réfraction et la réflexion intérieure, les forces répulsives la réflexion extérieure. Il y a autant d'espèces de particules que de couleurs, et chaque espèce est douée d'une réfrangibilité particulière.

L'ensemble des particules successives qui suivent la même ligne droite forme ce qu'on nomme un rayon lumineux ; mais ces particules peuvent être séparées par de grands intervalles. En effet, l'impression sur la rétine dure environ 1/10 de seconde ; il suffirait donc que 10 particules lumineuses vinssent en une seconde frapper notre œil, pour que l'impression causée par l'une d'elles ne fût pas effacée avant l'arrivée de la seconde, ou, ce qui revient au même, pour qu'il y eût sensation continue : en les supposant également espacées, elles se suivraient à 29800 kilomètres ou 7450 lieues de distance les unes des autres. En supposant qu'elles se succèdent au nombre de 100 par seconde, il y aurait encore de l'une à l'autre 2980 kilomètres d'intervalle.

On conçoit donc, dans cette hypothèse, comment les rayons lumineux émanés de sources diverses peuvent se croiser dans tous les sens, sans se faire obstacle. Mais il faut supposer à la masse de chacune d'elles une valeur si petite, que l'imagination a de la peine à s'en faire l'idée. J. Herschel fait à ce propos la comparaison suivante : « Si une molécule de lumière, dit-il, pesait un seul grain ($0^{gr},065$), son effet serait égal à celui d'un

boulet de canon de plus de 150 livres (56 kilogr.) animé d'une vitesse de 305 mètres par seconde. Quelle doit donc être cette ténuité, si des milliards de molécules rencontrées par des lentilles ou des miroirs n'ont jamais pu communiquer le moindre mouvement aux appareils les plus délicats imaginés exprès pour ces expériences ! » (*Traité de la Lumière*, t. I.)

Nous venons de dire que, pour expliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction de la lumière, Newton supposait que chaque molécule est, soit repoussée, soit attirée par les molécules des corps. L'intensité de ces forces, qui s'exercent dans des sphères infiniment petites, est prodigieuse : on a calculé qu'elle surpasse l'intensité de la pesanteur à la surface de la Terre au point qu'il faudrait, pour en exprimer la valeur en nombres, multiplier cette dernière intensité par un nombre formé du chiffre 2 suivi de 44 zéros.

Newton ayant considéré la lumière comme formée de particules très ténues, lancées dans l'espace avec une vitesse énorme, on pourrait croire qu'il expliquait les phénomènes de la réflexion en les assimilant à ceux qu'on observe quand un corps élastique vient à choquer la surface d'un plan dur et poli ; car, dans ce cas, le corps est renvoyé, comme le rayon lumineux, en faisant avec le plan un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Pour les partisans du système de l'émission, les choses ne se passent point ainsi; les molécules lumineuses n'arrivent pas jusqu'au contact des corps qui les réfléchissent[1]. Selon

1. En effet, Newton avait dû supposer que ces molécules sont d'une ténuité excessive, afin de faire comprendre comment elles peuvent traverser librement les masses des corps transparents, comment encore elles peuvent venir à chaque instant frapper les membranes si délicates de nos yeux sans les déchirer. Comparativement aux dimensions des particules de la lumière, les inégalités de la surface des corps les mieux polis, les poussières qui servent à les polir en abattant les plus fortes aspérités, sont des masses considérables. Dès lors, si la lumière se réfléchissait à la façon des corps élastiques, en touchant réellement la surface du miroir, les molécules lumineuses seraient détournées dans tous les sens par les aspérités de cette surface, et, comme le disait Biot, « la réflexion sur les corps les mieux polis par notre art ne devrait guère être moins grossière que sur les corps les plus raboteux. Mais puisque, au contraire, elle y est incomparablement plus abondante, plus régulière et plus parfaite, c'est une preuve que les choses ne se passent point comme dans la réflexion mécanique des corps élastiques, et que les particules lumineuses qui se réfléchissent n'arrivent pas jusqu'au contact des corps. »

eux, c'est une force répulsive qui s'exerce à partir de la surface d'incidence, et qui tend à renvoyer loin de cette surface un certain nombre des particules dont se compose chaque rayon lumineux incident. Arrivées à une faible distance de la surface, ces particules subissent l'action de cette force, et leur route, d'abord rectiligne, s'infléchit, décrit une courbe dont la convexité est tournée vers la surface réfléchissante, pour reprendre, à partir du point où elle s'en approche le plus, une marche précisément symétrique de la première moitié de la trajectoire (fig. 170)[1]. *Sa* représentant, en grandeur et en direction, la vitesse de la molécule lumineuse au moment où commence la sphère d'activité de la force répulsive, on peut décomposer cette vitesse en deux autres : l'une *Sm*, parallèle à la surface, n'est point altérée ; l'autre S*p*, normale au plan de réflexion, est directement opposée à la force répulsive, et par conséquent elle sera détruite progressivement par elle. La molécule S va donc décrire une courbe SM en s'approchant de la surface jusqu'au point M où la résultante de la composante normale et de la force répulsive sera nulle. A partir de ce point, la composante parallèle et la force répulsive réunies vont peu à peu rendre à la molécule lumineuse sa vitesse initiale : cette molécule décrira en s'éloignant du plan réfléchissant une courbe symétrique de SM, MS', de sorte que la direction nouvelle fera avec la normale un angle de réflexion précisément égal à l'angle d'incidence.

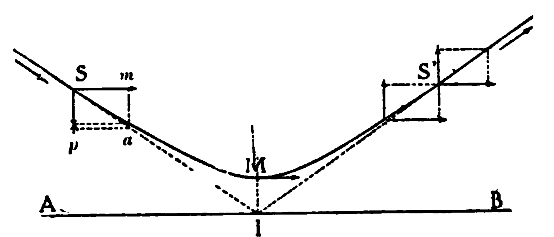


Fig. 170. — Théorie de la réflexion dans le système de l'émission.

Quant à la réfraction, elle est due, dans le système de l'émis-

1. La composante normale S*p* de la molécule S est progressivement diminuée par l'influence croissante de la force répulsive, tandis que la composante parallèle S*m* reste invariable. En M la première est annulée; mais à partir de ce point la force répulsive restitue en sens contraire à la molécule sa vitesse normale. La loi de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion s'explique par cette symétrie d'action de la force répulsive.

sion, non plus à une force répulsive, mais à une force attractive, sans laquelle on n'eût pas compris, en effet, comment le rayon lumineux, ou la molécule lumineuse, non seulement pénétrait dans le nouveau milieu, mais y suivait une direction différente de la direction incidente, et plus rapprochée de la normale. Dans cette hypothèse en effet la composante normale de la vitesse de la molécule lumineuse est progressivement augmentée de la force attractive qui va en croissant rapidement, à mesure qu'on s'approche de la surface réfringente. Elle décrit une courbe, jusqu'à ce que, dans l'intérieur du milieu, elle atteigne une distance où la force attractive agit également de chaque côté. Alors la molécule continue son chemin en ligne droite dans sa nouvelle direction. Il est aisé de comprendre que l'effet de la force attractive produit dans la vitesse de la molécule une augmentation, puisque, la composante parallèle n'étant pas changée, la composante normale s'est accrue de toute l'intensité de l'attraction. Ainsi la vitesse de la lumière, dans le système de l'émission, doit être plus grande dans un milieu réfringent quelconque que dans le vide, et d'autant plus grande que l'indice de réfraction du milieu est plus grand lui-même.

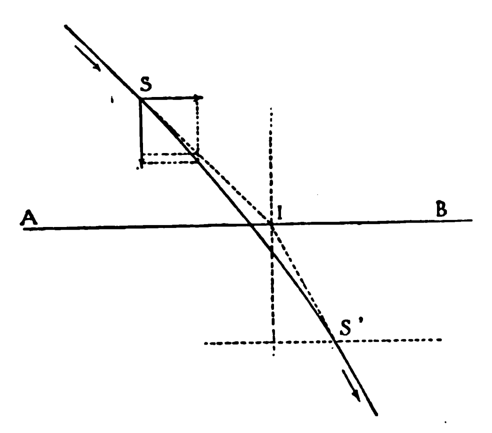


Fig. 171. — Théorie de la réfraction dans le système de l'émission.

Maintenant, comment concilier l'explication des phénomènes de la réflexion avec celle des phénomènes de la réfraction? Comme l'a dit Biot, un des plus éminents et des plus persistants défenseurs de la théorie newtonienne, ces deux explications paraissent contradictoires. La seconde exige « que la réfraction des rayons lumineux soit produite par l'affinité des molécules des corps pour la lumière », tandis que « les mêmes molécules

semblent être repoussées par le corps réflecteur, au lieu d'en être attirées. »

De là la nécessité de faire une nouvelle hypothèse, suggérée d'ailleurs à Newton par le besoin d'expliquer d'autres phénomènes, ceux des anneaux colorés dans les lames minces, phénomènes que nous décrirons bientôt. Cette hypothèse est celle des *accès de facile transmission* et des *accès de facile réflexion*. Elle consiste en ce que toute molécule lumineuse se trouve, pendant tout le cours de sa propagation, dans des dispositions alternatives et périodiques. A chaque retour de l'une de ces dispositions, la molécule peut être *aisément transmise ;* et dans chaque intervalle, elle se trouve au contraire dans la disposition d'être *aisément réfléchie*[1].

En quoi consistent ces dispositions singulières, qui font que tantôt c'est la force répulsive, tantôt la force attractive qui agit sur les molécules lumineuses au moment où elles entrent dans la sphère d'activité de ces forces opposées, c'est sur quoi les partisans du système de l'émission et Newton lui-même ne se sont pas expliqués d'une manière positive. Au reste, ce n'est pas le lieu d'exposer dans son intégrité une théorie qui a eu jusqu'au milieu du siècle actuel des partisans illustres et qui longtemps a suffi à rendre compte de presque tous les phénomènes de la lumière. Aujourd'hui, la théorie des ondulations a prévalu définitivement : les magnifiques travaux de notre grand Fresnel l'ont édifiée sur la solide base du calcul, appuyé lui-même par les vérifications expérimentales.

§ 3. THÉORIE DES ONDULATIONS.

On fait ordinairement remonter jusqu'à Descartes l'origine du système des ondulations. Verdet, dans ses *Leçons d'optique*

1. Voici la définition donnée par Newton dans son *Traité d'optique :* « Les retours de la disposition d'un rayon quelconque à être réfléchi, c'est ce que j'appellerai ses *accès de facile réflexion*, comme j'appellerai les retours de sa disposition à être transmis, ses *accès de facile transmission;* et l'espace qui se trouve entre chaque retour et le retour suivant, je le nommerai *l'intervalle de ses accès.* » (*Traduction Coste.*)

physique, combat cette assertion, qui a été surtout accréditée par Euler et qui est assurément erronée. Nous avons vu déjà, en effet, que Descartes considérait la transmission de la lumière comme instantanée. Le seul point commun entre la théorie des ondes et celle de Descartes est l'hypothèse d'un milieu qui transmet la lumière; mais pour lui ce milieu est le *plein absolu*. Il regarde bien la lumière comme due à un certain mouvement vibratoire des particules des corps, mais ce mouvement n'est pas transmis par des ondes successives; c'est pour Descartes l'origine d'une impulsion qui se communique à toute distance sans aucun intervalle de temps.

Bien que l'on retrouve quelque trace de la théorie des ondulations dans les écrits de Léonard de Vinci, de Galilée, dans un ouvrage d'Ango, en réalité c'est à Huygens que revient l'honneur de l'avoir véritablement fondée. Euler, Thomas Young et enfin Fresnel ont complété les vues d'Huygens et établi sur des bases inébranlables la véritable théorie de la lumière. Essayons d'en donner une idée.

Le premier principe sur lequel elle repose est l'existence, dans tout l'espace, dans ce qu'on nomme le vide interplanétaire ou intersidéral comme entre les molécules de tous les corps, d'un fluide éminemment élastique qui a reçu le nom d'*éther*. Dans le vide de toute matière pondérable, l'éther est répandu d'une manière absolument uniforme, de sorte que sa densité y est constante, et que son élasticité est la même dans tous les sens. Au contraire, dans les milieux pondérables, c'est-à-dire dans les corps solides, liquides, ou gazeux, il est possible que la densité de l'éther soit différente de celle qu'il possède dans le vide; mais elle y est pareillement constante ainsi que son élasticité, si ces corps sont homogènes et non cristallisés. Dans les cristaux dont la forme primitive n'est pas un polyèdre régulier, l'élasticité varie suivant la direction.

Les sources lumineuses sont des corps dont les molécules se trouvent (dans des conditions spéciales, telles qu'un certain degré de température, des combinaisons chimiques, etc.) ani-

mées de mouvements vibratoires périodiques d'une excessive rapidité. Ces vibrations se communiquent à l'éther et s'y propagent sous la forme d'ondes qui sont sphériques dans le vide ou dans les milieux homogènes non cristallisés, mais qui peuvent affecter d'autres formes, être ellipsoïdales par exemple, dans les milieux où l'élasticité de l'éther varie avec la direction, comme dans certains cristaux.

Pendant qu'une molécule d'éther effectue une oscillation complète correspondant à la vibration d'origine, son mouvement oscillatoire se communique de proche en proche à une file de molécules semblables situées dans la direction d'un rayon de la sphère. Le temps nécessaire au mouvement d'aller et de retour de la molécule éthérée est la *durée de la vibration*, et la distance à laquelle il s'est propagé pendant ce temps, c'est-à-dire la distance entre deux molécules animées de la même vitesse de vibration et dans la même phase oscillatoire, est ce qu'on nomme la longueur d'ondulation ou la *longueur d'onde*. Enfin la *surface de l'onde* est l'ensemble des points où l'ébranlement lumineux arrive au même instant; elle est sphérique quand, dans le milieu où la lumière se propage, l'éther a la même élasticité dans tous les sens; à une grande distance de la source, il est clair que la surface de l'onde peut être considérée comme plane.

Les ondes lumineuses et les ondes sonores présentent, à certains points de vue, des analogies que les définitions qui précèdent font aisément découvrir : les unes et les autres sont dues aux vibrations des molécules des sources de l'ébranlement; ces vibrations étant isochrones, il en est de même des ondes, quand elles viennent d'un son ou d'une lumière simple. L'onde sonore se propage uniformément, comme les ondes lumineuses. Les vibrations sonores plus ou moins rapides produisent des sons dont la hauteur musicale va en croissant avec le nombre des ondes que l'oreille reçoit dans un même intervalle d'une seconde. De même, il y a des ondes lumineuses dont la période

diffère en durée : les plus longues ou les plus lentes correspondent à la partie la moins réfrangible du spectre ou aux rayons rouges ; puis, lorsqu'elles deviennent de plus en plus rapides ou de plus en plus courtes, la couleur de la lumière produite change, passe du rouge au jaune, au vert, au bleu, au violet, en passant par toutes les nuances du ruban coloré que donne l'analyse de la lumière blanche par le prisme. Les couleurs successives sont donc comme les *tons* de la lumière.

Mais si les analogies sont nombreuses entre le son et la lumière, entre les ondes sonores et les ondes lumineuses, les différences ne sont pas moins grandes, et certaines d'entre elles sont d'une importance capitale pour la théorie.

En premier lieu, le milieu où le son se propage doit toujours être un milieu pondérable, gazeux, solide ou liquide. Les ondes de la lumière, au contraire, naissent et se propagent dans le vide de toute matière pondérable, et lorsqu'elles pénètrent dans les corps, c'est toujours le même milieu élastique plus ou moins condensé, l'éther, qui les constitue par les oscillations périodiques de ses molécules.

La vitesse de propagation, uniforme et constante, avec laquelle se transmet un ébranlement dans un milieu élastique, dépend, comme la théorie le prouve, du rapport qui existe entre l'élasticité du milieu et sa densité $\left(\text{on a } v=\sqrt{\frac{e}{d}}\right)$. Dans l'air, les ondes sonores se propagent avec une vitesse d'environ 340 mètres par seconde. Dans l'éther du vide, nous avons vu que les ondes lumineuses parcourent, dans le même temps, 300 millions de mètres, distance près de 900 000 fois aussi grande que la première. D'où il résulte que l'élasticité de l'éther est très grande ou sa densité très petite, ou même que ces deux éléments sont à la fois, le premier considérable et le second très faible.

Connaissant la vitesse du son et le nombre des vibrations d'un son donné en une seconde, on en déduit aisément la longueur de l'onde sonore correspondante : c'est à peu près $0^{m},4$

pour le *la* du diapason par exemple. Nous verrons qu'on a procédé autrement pour les ondes lumineuses. Comme elles sont infiniment trop rapides pour qu'on puisse en compter le nombre et qu'il n'y a pas de procédé qui permette de les enregistrer, on a déterminé leur longueur. Fresnel a fait des expériences qui lui ont permis de calculer la longueur d'ondulation de la lumière rouge homogène que laisse passer un verre coloré. Il l'a trouvée, en prenant pour unité le millimètre, égale à $0^{mm},000638$, quantité prodigieusement plus petite que la longueur d'une onde sonore. Il en résulte que la rapidité avec laquelle se succèdent les ondes lumineuses est excessive. En effet, en une seconde la lumière parcourt 300 millions de mètres; la lumière rouge dont nous venons de parler était donc produite par des vibrations qui se succédaient autant de fois dans une seconde que le nombre $0^{mm},000638$ est contenu lui-même dans 300 millions. C'est ici 470 trillions.

Les longueurs d'onde varient, avons-nous dit, avec la couleur ou avec la réfrangibilité de la lumière. Il en est donc de même des nombres de vibrations correspondantes, effectuées par les molécules des sources lumineuses ou par celles de l'éther. En voici le tableau pour les couleurs principales du spectre de la lumière solaire :

Couleurs principales.	Longueurs d'onde en millionièmes de millimètre.	Nombre de vibrations en trillions.
Violet extrême	406	739
Violet	423	709
Violet indigo	439	683
Indigo	449	668
Indigo bleu	459	654
Bleu	475	631
Bleu vert	492	610
Vert	512	586
Vert jaune	532	564
Jaune	551	544
Jaune orangé	571	525
Orangé	583	514
Orangé rouge	596	503
Rouge	620	484
Rouge extrême	645	465

La valeur moyenne de la longueur d'une onde lumineuse ne dépasse guère la moitié d'un millième de millimètre, de sorte que, dans l'intervalle d'un mètre, il n'existe pas moins de 2 millions d'ondulations. Quant à se figurer le nombre prodigieux des ondes qui se succèdent en une seule seconde, nombre qui est de 600 millions de milliards, cela semble impossible à l'imagination. Mais il ne faut pas oublier que toutes les grandeurs qui nous sont familières, distances, vitesses, temps, sont toutes relatives : dans le domaine du réel, il est tout aussi facile de concevoir ce qui nous paraît infiniment grand. Dans la théorie des ondulations, comme dans celle de l'émission, les nombres qui servent à mesurer les éléments constitutifs de la lumière sont également considérables. Ce qui a permis de décider entre ces deux théories, c'est que toutes les difficultés résultant de l'adoption de l'une ou de l'autre ont été successivement levées pour la seconde, tandis que les partisans de l'émission étaient forcés, pour expliquer les faits nouveaux, d'accumuler les hypothèses. Ces hypothèses, souvent fort ingénieuses, ont été insuffisantes dans certains cas, et même se sont heurtées à des contradictions formelles de l'expérience. Au contraire, la théorie des ondulations s'est trouvée assez féconde pour fournir à l'avance l'indication de vérités nouvelles, conséquences nécessaires des principes que l'observation est venue confirmer après coup. Nous donnerons des exemples de ces différents genres de preuve.

CHAPITRE XII

PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION

§ 1. INTERFÉRENCE DES ONDES LUMINEUSES. — PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION.

En 1665, le P. Grimaldi publia à Bologne un curieux ouvrage intitulé *Physico-mathesis de lumine*, dans lequel se trouvent décrits pour la première fois des phénomènes auxquels il donna le nom, qu'ils conservent encore, de phénomènes de *diffraction*. Voici en quoi consistent ces faits nouveaux, ou du moins nouvellement observés, que, depuis, les physiciens ont étudiés et multipliés au point d'en faire une branche importante de l'optique.

Si l'on introduit un trait de lumière dans la chambre obscure à travers une très petite ouverture, on remarque que les ombres des corps opaques étroits, exposés à cette lumière, sont beaucoup plus étendues qu'elles ne devraient l'être d'après la marche en ligne droite des rayons lumineux. En outre, ces ombres se trouvent bordées de franges colorées, parallèles entre elles et aux bords des corps opaques. Le phénomène disparaît si, au lieu d'une étroite ouverture, c'est par un large trou que passe le faisceau de lumière.

En substituant au corps opaque une très petite ouverture circulaire percée dans une lame métallique, par exemple, et en recevant la lumière sur un écran, on obtient des anneaux concentriques de franges colorées, situées les unes dans l'image géométrique de l'ouverture, les autres au dehors, c'est-à-dire

au dedans de l'ombre de la plaque. Enfin deux ouvertures très voisines donnent deux séries d'anneaux qui se superposent en partie, et de plus on aperçoit trois séries de franges obscures rectilignes, qui disparaissent dès qu'on bouche l'un des trous (fig. 172). Cette dernière expérience causa un étonnement profond dans le monde des physiciens, parce qu'elle bouleversait toutes les idées qu'ils s'étaient faites jusqu'alors sur la nature de l'agent lumineux. Et, en effet, elle mettait en évidence ce singulier résultat, que *de la lumière ajoutée à de la lumière produit en certains cas de* L'OBSCURITÉ !

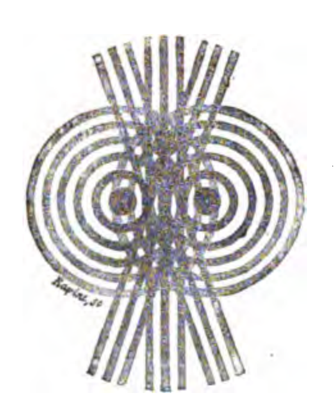


Fig. 172. — Expérience de diffraction. Franges obscures et franges brillantes produites par un système de deux petites ouvertures circulaires.

Newton étudia les phénomènes de diffraction révélés par le physicien bolonais; il y joignit des observations nouvelles, et chercha à expliquer la diffraction par une déviation que les bords des corps opaques font subir aux rayons de lumière. Frauenhofer, Young et enfin Fresnel achevèrent d'en découvrir les lois, et ce dernier savant les rattacha de la façon la plus heureuse à la théorie des ondulations. Avant de poursuivre la description des phénomènes, donnons une idée de ce qu'Young a appelé le *principe des interférences*, principe dont il a exposé la théorie dans le système des ondulations, et que plus tard Fresnel a démontré par la fameuse expérience des deux miroirs.

Supposons que deux rayons de lumière suivent la même direction AB, qu'ils aient même intensité, et que les longueurs d'onde de chacun d'eux soient égales[1], auquel cas les mouve-

1. Le raisonnement ci-dessus n'est « applicable, en effet, qu'à des systèmes composés d'ondes de même longueur; car si les ondes de l'un étaient plus longues que celles de l'autre, quelque petite que fût d'ailleurs la différence, il arriverait que la position relative des ondes ne serait pas la même dans toute l'étendue des deux groupes, et que, tandis que les premières ondes se contrarieraient presque complètement, les ondes suivantes ne seraient plus en discordance complète, et finiraient même par se trouver d'accord un peu plus loin;

ments de vibration de l'éther auront même amplitude aux mêmes phases. Si les ondes du premier rayon coïncident avec celles du second, il est clair que leurs intensités devront s'ajouter : la quantité de lumière sera augmentée par leur concours. Mais si l'un d'eux est en retard sur l'autre, et cela précisément d'une demi-longueur d'onde, les molécules d'éther situées le long de la ligne AB seront sollicitées d'un côté par des forces dont l'intensité et la direction seront représentées par la courbe *aaa*..., et d'autre côté par des forces égales et contraires représentées par la courbe *a'a'a'*.... Toute molécule telle que *m* restera donc en repos sous l'action de ces forces opposées; le mouvement vibratoire cessera, et l'obscurité succèdera à la lumière. On dit alors que les ondes ou les rayons lumineux *interfèrent*. Même résultat, si le retard était de 3/2, 5/2... et en général d'un nombre impair de demi-ondulations.

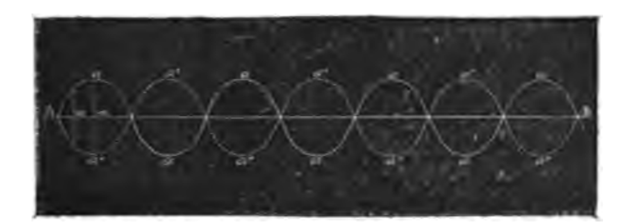


Fig. 173. — Interférence des ondes lumineuses.

S'il est d'un nombre pair de demi-ondulations, le résultat est le même que s'il y avait coïncidence. Enfin, entre ces deux cas extrêmes, l'intensité lumineuse est tantôt augmentée, tantôt diminuée; mais il n'y a en aucun point destruction absolue de lumière.

Théoriquement, ce raisonnement, qui est une conséquence nécessaire du système des ondulations, rend parfaitement compte de l'expérience de Grimaldi, et de toutes celles où

d'où résulterait une succession de vibrations faibles et fortes analogues aux battements que fait entendre la consonnance de deux notes peu différentes; mais ces alternatives de lumière faible et forte, se succédant avec une rapidité prodigieuse, ne produiraient sur l'œil qu'une sensation continue. » (A. Fresnel, *De la Lumière*, etc.)

apparaissent des franges obscures ou brillantes. Il restait néanmoins à le vérifier par l'observation.

Young, avant d'étudier l'optique, s'était occupé des lois des vibrations des tuyaux sonores, et c'est le phénomène des battements qui paraît lui avoir suggéré la première idée de l'interférence des ondes lumineuses. Il posa ce principe et l'appliqua à l'explication de plusieurs phénomènes, avant d'en avoir trouvé une démonstration expérimentale. C'est une observation fortuite qui le mit sur la voie de cette preuve directe. « Ayant eu occasion d'observer l'ombre d'un cheveu éclairé par une fente lumineuse très étroite, il remarqua au milieu de l'ombre une frange blanche et brillante entre deux franges sombres. Il répéta l'expérience en substituant au cheveu un rectangle opaque très étroit, et reconnut dans l'ombre de ce rectangle une série de franges alternativement brillantes et obscures. La frange centrale est blanche et bordée de deux franges obscures ; les autres franges brillantes sont colorées très sensiblement et d'autant plus qu'on s'éloigne davantage du milieu de l'ombre. Young fit de plus une observation très importante : en arrêtant avec un écran opaque la portion de lumière qui passait dans le voisinage d'un des bords de l'écran, il vit disparaître complètement les franges qui existaient à l'intérieur de l'ombre. Il était difficile après cela de se refuser à admettre que ces franges sont dues au concours des rayons qui passent près des deux bords opposés de l'écran opaque..... Young imagina une seconde expérience, plus concluante encore, pour démontrer l'existence des interférences lumineuses. Il fit arriver le faisceau des rayons solaires transmis par un trou étroit, pratiqué dans le volet de la chambre obscure, sur deux autres trous étroits et voisins, percés dans un écran opaque ; il reçut sur un second écran les deux cônes lumineux dilatés par la diffraction de manière à empiéter l'un sur l'autre, et, dans l'ombre de la partie opaque située entre les deux ouvertures du premier écran, il aperçut une série de bandes très fines, alternativement brillantes et obscures. Ces bandes étaient d'autant plus étroites que la distance qui sépa-

rait les deux trous était plus grande. Elle disparaissait dès qu'on fermait l'un de ces deux trous ; elles disparaissaient également lorsque au faisceau unique originaire d'un trou étroit on substituait la lumière solaire directe ou celle d'une flamme artificielle, c'est-à-dire quand on revenait à la disposition adoptée par Grimaldi[1]. Les bandes occupaient d'ailleurs exactement les positions où, d'après la théorie, les mouvements vibratoires devaient se renforcer ou s'affaiblir réciproquement. » (*Leçons d'optique physique*, par E. Verdet.)

Le savant physicien à qui nous venons d'emprunter la citation précédente fait observer que les expériences d'Young, si ingénieuses qu'elles fussent, ne prouvaient l'interférence que pour des rayons diffractés, modifiés dès lors par un phénomène encore imparfaitement connu, et qu'il restait à savoir si c'était un principe applicable à tous les rayons lumineux.

C'est ce qu'a fait Fresnel, notamment par l'expérience des deux miroirs dont nous avons parlé plus haut. Cette expérience est trop importante pour que nous ne la rapportions pas ici : la nature et les bornes de cet ouvrage ne nous permettant point d'aborder l'explication théorique de la plupart des phénomènes, il faut tout au moins que le principe en soit exposé assez clairement, pour que le lecteur accepte les conséquences avec confiance.

Deux miroirs plans ON, OM (fig. 174), en métal ou en verre noir, sont placés verticalement dans la chambre obscure, de manière à faire entre eux un angle très obtus. En avant de ces miroirs, un faisceau de lumière solaire est concentré en S par une lentille sphérique ou cylindrique, de manière à donner soit un point, soit une ligne lumineuse. Deux images se forment dans l'un et dans l'autre miroir, l'une en *s* pour le miroir ON, l'autre en *s'* pour le miroir OM. On a donc ainsi deux sources de lumière qui offrent cette particularité qu'émanant d'une source

1. D'après Verdet, les expériences de Grimaldi ne donnent pas de véritables bandes d'interférence, bien que, dans son traité, le physicien bolonais ait dit formellement que deux lumières peuvent dans certains cas s'affaiblir par leur concours.

commune, elles sont à tout instant dans le même état de vibration. Si maintenant on place un écran vertical en avant des miroirs, et de façon à recevoir à la fois les faisceaux lumineux émanés des deux images, on apercevra sur l'écran une bande brillante dans la direction du prolongement de la ligne OA, et, de chaque côté de cette bande, une série de franges alternativement obscures et brillantes. Si l'on masque l'un des deux miroirs, à l'instant les franges disparaissent ; l'écran reste uniformément éclairé.

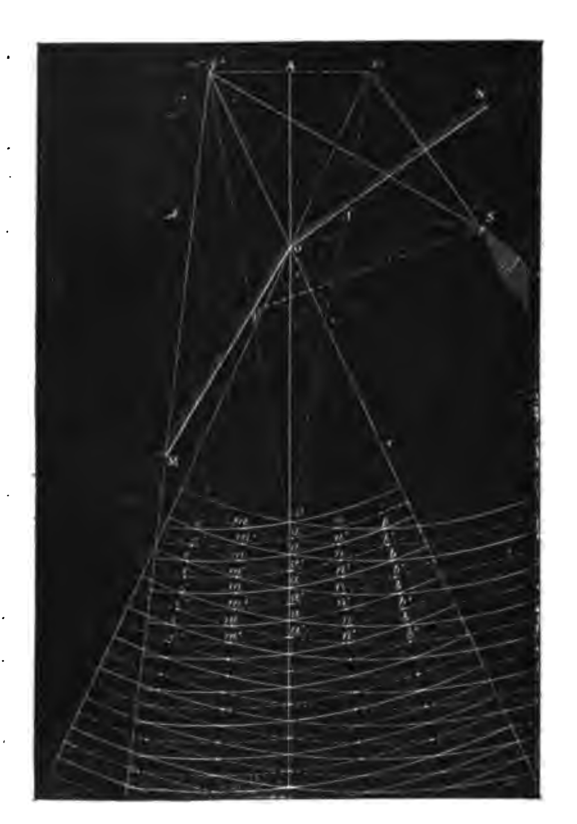


Fig. 174. — Expérience des deux miroirs de Fresnel; démonstration expérimentale du principe des interférences.

On le voit, le phénomène est le même que dans l'expérience des deux ouvertures de Thomas Young, et il reste à expliquer comment de la lumière ajoutée à de la lumière peut produire de l'obscurité ; il faut montrer, comme nous l'avons vu, que partout où il y a des franges obscures, c'est que les ondes lumineuses émanées des deux sources interfèrent, qu'elles sont au contraire dans la même phase partout où l'on aperçoit les franges brillantes. C'est ce que montre la figure 174, où l'on voit tracées les ondes concentriques émanées de *s* et de *s'*. Ces deux systèmes d'ondes se croisent et se coupent en divers points. Or ceux de ces points qui, tels que *a*, sont situés sur la perpendiculaire AO

à *ss'*, sont dans la même phase d'ondulation dans l'un comme dans l'autre système, puisque, les rayons *sa*, *s'a* étant de même longueur, il en est de même des chemins SI*a* et SI'*a*, suivis par les deux ondes lumineuses émanées de la source S, et réfléchies sur l'un et sur l'autre miroir. Il en est de même pour tous les points *a'a'a'*... situés dans le plan vertical passant par AO. Les intensités lumineuses s'ajoutent donc dans ce plan ; de là la frange centrale brillante. Aux points tels que *n n'*, la différence de marche des ondes qui se croisent en ces points est de 1/2, 3/2... longueurs d'onde, c'est-à-dire un nombre impair de demi-ondulations : il y a interférence et par suite frange obscure ; il en est de même pour les points *mm'*... Plus loin, les points *bb'*... *cc'*... appartiennent à des rayons dont chacun est en retard sur l'autre d'un nombre pair de demi-longueurs d'onde : *franges brillantes*... et ainsi de suite. L'aspect général du phénomène est celui que montre la figure 175. Dès que l'on masque par un écran l'un ou l'autre des deux miroirs, les franges disparaissent, et le premier écran, sur lequel on recevait ces franges, reprend un éclat uniforme.

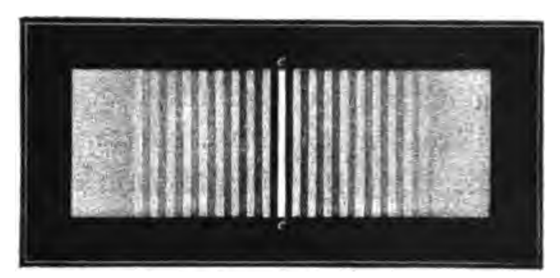


Fig. 175. — Franges d'interférence dans l'expérience des deux miroirs.



Fig. 176. — Franges d'interférence ; inégales largeurs des franges obtenues avec des lumières de diverses couleurs.

Fresnel a employé successivement, pour faire cette expérience capitale, des lumières de toutes les couleurs simples : il a trouvé des franges de chacune de ces teintes, mais d'autant

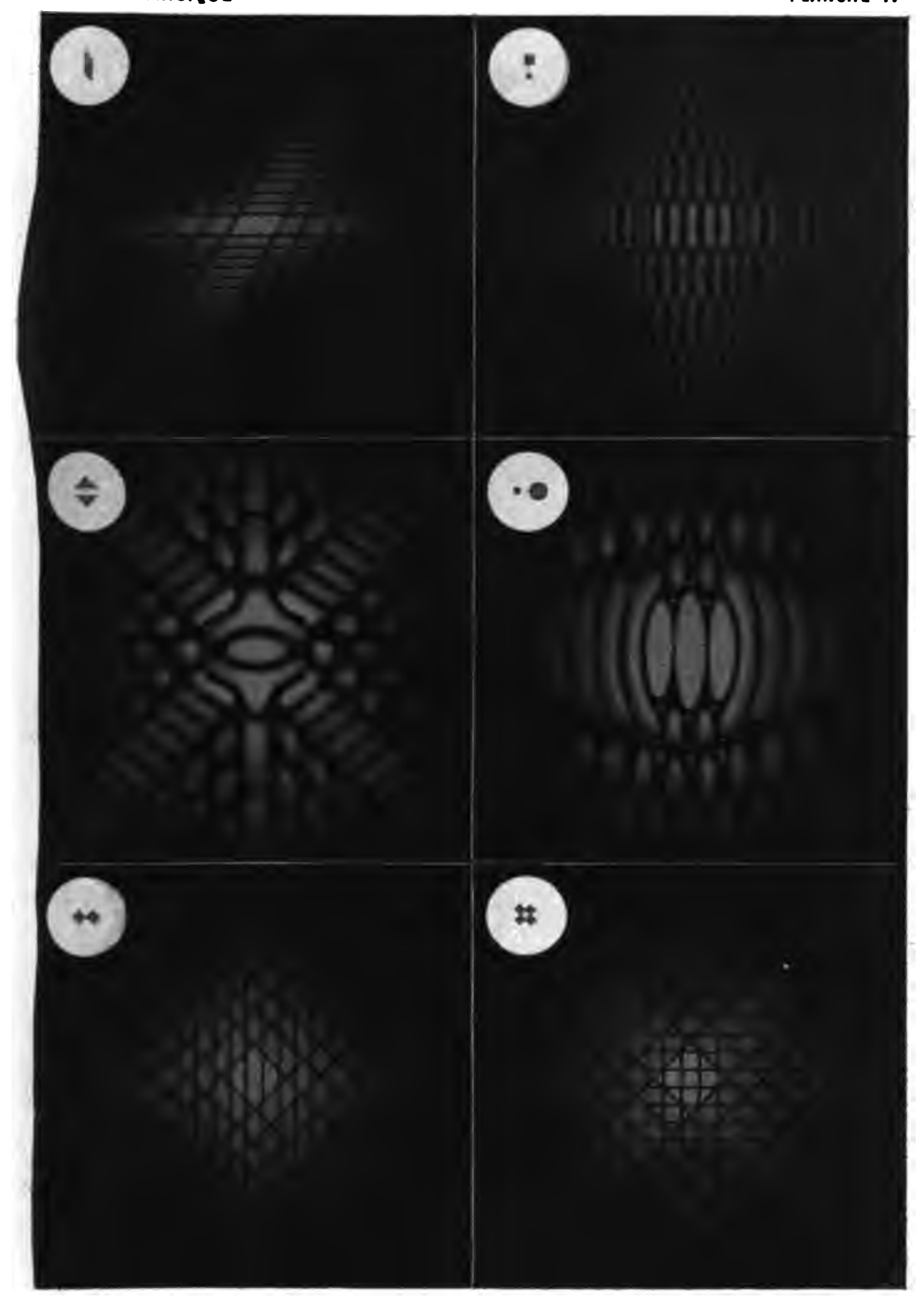
plus serrées qu'on s'éloigne plus du rouge dans la série des couleurs prismatiques (fig. 176). Le violet donne les franges les plus étroites. C'est en mesurant avec une grande précision les distances des franges données par la lumière rouge, que l'illustre physicien est parvenu à en déduire les longueurs d'ondulation des lumières de diverses couleurs, et par suite les nombres de vibrations exécutées par l'éther dans le court intervalle d'une seconde, nombres si prodigieusement grands, comme nous l'avons vu plus haut. Les franges provenant de la lumière blanche doivent donc être formées des franges colorées de chacune des teintes du spectre, se superposant de façon que le violet soit du côté de la bande brillante centrale. C'est aussi ce que constate l'observation.

Ainsi se trouva confirmée par une expérience mémorable la vérité de la théorie des ondulations, dont l'analyse mathématique a su tirer d'ailleurs une foule de conséquences, les unes déjà connues par l'observation, les autres devançant l'observation même, et lui servant de guide. Les noms de Huygens, d'Young et de Fresnel resteront désormais attachés à cette belle théorie, comme celui de Newton l'est à celle de la gravitation universelle.

§ 2. PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION PAR LES PETITES OUVERTURES.

Revenons maintenant aux phénomènes de diffraction qui tous se rattachent au principe de l'interférence des ondes lumineuses. Ils sont nombreux : aussi ne choisirons-nous, dans le nombre, que quelques-uns des plus remarquables.

Newton, en répétant et en variant les expériences de Grimaldi, sur les ombres agrandies des corps déliés tels que des cheveux, des fils, des épingles, des pailles, s'assura que la déviation des rayons lumineux n'était pas due, comme on l'avait cru d'abord, à une réfraction dans une mince couche d'air plus dense, environnant le corps (hypothèse soutenue par Mairan). Il vit aussi



FRANGES MONOCHROMATIQUES

Phénomènes d'Interférence

DIFFRACTIONS PAR DE PETITES OUVERTURES

que les franges se formaient quelle que fût la nature des substances employées. Qu'il s'agît de métaux, de pierres, de verre, de bois, de glace, etc., il reconnut toujours trois franges se succédant ainsi à partir de l'ombre : frange intérieure : violet, bleu foncé, bleu clair, vert, jaune et rouge ; frange intermédiaire : bleu, jaune et rouge ; frange extérieure : bleu pâle, jaune pâle et rouge. Il remarqua aussi le fait, que les lumières simples du spectre donnent des franges inégalement serrées. Mais de toutes ses expériences il ne conclut autre chose, sinon que les rayons de lumière subissent, en passant vers les bords des corps, des inflexions d'autant plus fortes qu'ils rasent de plus près leur surface. C'était une hypothèse naturelle dans le système de l'émission ; mais nous venons de voir quelle est l'explication véritable.

Toutes les expériences, fort nombreuses, exécutées depuis, peuvent se ranger en deux espèces : la première comprend les phénomènes de diffraction produits par des bords rectilignes, par exemple par une ou plusieurs fentes très étroites, en forme de parallélogramme, ou par un écran très mince, un fil métallique, un cheveu : la seconde comprend les phénomènes obtenus quand la diffraction s'opère à travers une ou plusieurs ouvertures très petites, carrées, triangulaires, circulaires, ou sur les bords d'un écran circulaire d'une très petite dimension. Les planches IV et V représentent plusieurs systèmes de franges produits dans ces circonstances variées ; les unes, irisées, proviennent de la lumière blanche ; les autres, monochromatiques, d'une lumière simple, par exemple de la lumière rouge. On voit, dans plusieurs cas, les franges irisées accompagnées d'une multitude de petits spectres dont les vives couleurs ajoutent à la beauté du phénomène.

J. Herschel a observé (et Arago a étudié après lui) de curieux effets de diffraction, en plaçant devant l'objectif d'une lunette astronomique des diaphragmes de formes variées, et en observant ainsi différentes étoiles simples ou doubles. Avec une ouverture annulaire, il a vu des anneaux colorés environnant les

images des points lumineux, qui présentaient alors des disques semblables à ceux des planètes. Des diaphragmes triangulaires donnaient au contraire des étoiles à six rayons; une ouverture formée par douze carrés concentriques donnait une étoile à quatre rayons; enfin, en perçant régulièrement des triangles équilatéraux sur le diaphragme, il obtint une série de disques circulaires rangés sur six lignes qui vont en divergeant à partir du disque central incolore et très brillant : ils sont entourés chacun d'un anneau plus ou moins coloré et vont s'allongeant en spectres, à mesure qu'ils s'éloignent du centre (fig. 177).

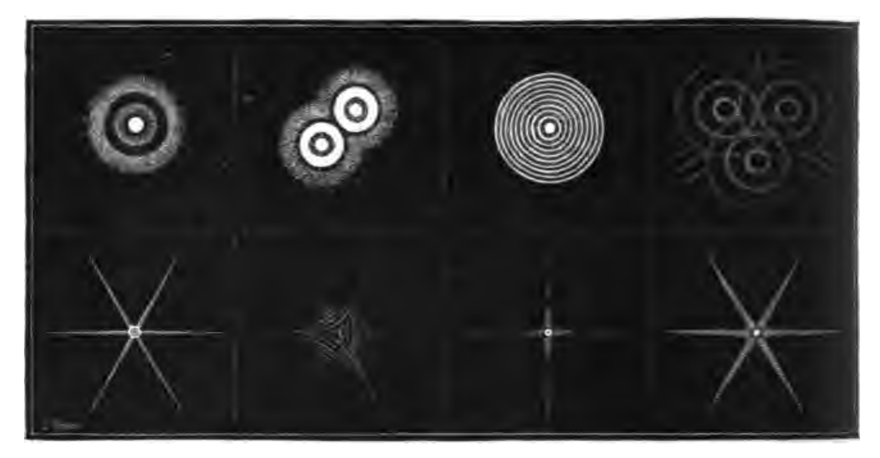


Fig. 177. — Effets de diffraction dans les lunettes astronomiques, d'après J. Herschel.

Tous ces phénomènes sont certes extrêmement curieux; les magnifiques couleurs qu'ils présentent à l'œil en font autant de tableaux dont la variété égale la splendeur. Mais, aux yeux du physicien, ils offrent un genre d'intérêt bien plus précieux encore, en ce sens qu'ils sont autant de confirmations de la belle théorie des ondulations de l'éther. L'analyse mathématique, appliquée aux différents cas de diffraction, donne des résultats qui concordent d'une façon merveilleuse avec ceux de l'observation. Nous avons dit plus haut qu'elle les avait quelquefois devancés : en voici un exemple bien remarquable. Le géomètre Poisson, ayant soumis au calcul le problème qui consiste à déterminer l'ombre et les franges produites par un très

petit disque opaque exposé à la lumière qui diverge d'un point lumineux, trouva que le centre de l'ombre devait être aussi brillant que si le disque n'existait pas : cette lumière était l'effet résultant de la diffraction des ondes lumineuses sur le bord de l'écran. Un tel résultat était si opposé aux observations antérieures[1], que Poisson le présenta comme une objection sérieuse à la théorie des ondulations. Mais Arago ayant fait l'expérience avec le soin nécessaire, en employant un petit disque de métal cimenté sur une plaque de verre parfaitement homogène et diaphane[2], le point lumineux apparut comme le calcul l'avait indiqué. On eût dit que l'ombre était produite par un écran percé au centre. C'est évidemment là un des plus beaux triomphes de la théorie, un témoignage décisif en faveur du système des ondulations et de l'existence de l'éther.

§ 3. LES RÉSEAUX. — FRANGES POLYCHROMATIQUES.

Frauenhofer, dont nous avons cité déjà les belles expériences sur les raies du spectre, porta dans l'étude des phénomènes de diffraction ce génie de la précision qui le distinguait à un si haut degré. Après avoir observé les images produites par un nombre très limité de petites ouvertures, il eut l'idée de voir ce qui se passe quand la lumière traverse un réseau formé d'une multitude de fils très fins, parallèles ou croisés. Il employa d'abord un réseau en fil d'archal, composé d'un grand nombre

1. Du moins le croyait-on alors. A la vérité, l'expérience proposée par Poisson en vue de la réfutation de la théorie que présentait Fresnel, avait été faite vers 1715 par l'astronome français Delisle et était complètement oubliée un siècle plus tard. (V. Verdet, *Leçons d'optique physique.*)

2. « Dès que le diamètre de l'écran est un peu grand, dit Fresnel, par exemple d'un centimètre (celui d'Arago avait 2 millimètres), les moindres défauts de ses bords ou de la plaque de verre sur laquelle il est fixé altèrent la régularité des anneaux obscurs et brillants qui entourent la tache blanche du centre de l'ombre. Il faut que le petit disque soit tourné avec le plus grand soin en forme de cône tronqué, de manière que les bords soient taillés en biseau. La plaque de verre doit être parfaitement exempte de stries, et avoir ses faces bien planes. » On voit, par l'indication de ces précautions, avec quel soin les expériences d'optique doivent généralement être conduites pour réussir.

de fils très fins tendus sur un cadre rectangulaire, au moyen de deux vis parfaitement semblables. Puis, pour obtenir une plus grande régularité et une plus grande finesse dans les intervalles qui laissent passer la lumière, il traça sur des plaques de verre couvertes d'une feuille d'or des lignes parallèles et équidistantes ; puis il grava les mêmes traits au diamant sur le verre même, formant ainsi plus de 1000 divisions par millimètre. Chaque strie est un écran opaque, et les intervalles des stries laissent passer la lumière. Du reste, un nombre beaucoup moindre de divisions rend le réseau plus régulier, et 38 traits suffisent au besoin pour observer les phénomènes.

Outre les réseaux à lignes parallèles, Frauenhofer étudia les réseaux à mailles carrées, formés par deux séries de lignes se croisant à angle droit, et ceux à mailles circulaires ou de toute autre forme. Il obtint de la sorte un grand nombre de figures où les franges et les spectres se distribuaient avec une symétrie merveilleuse; mais il fit plus, il étudia les lois de cette distribution, lois que M. Babinet a prouvé être autant de conséquences nécessaires du principe des interférences.

On voit dans la planche V le phénomène résultant du passage de la lumière à travers un réseau à lignes parallèles : au milieu est une ligne brillante, puis deux larges intervalles obscurs suivis de chaque côté de deux spectres dont le violet est tourné vers le centre, et si purs, que les raies sombres y sont aisées à distinguer. Au delà, viennent deux nouvelles bandes obscures, et enfin deux séries de spectres superposés de plus en plus étalés et plus pâles. Un réseau à mailles carrées donne l'image représentée, dans la même planche V, au-dessous de la précédente : outre la ligne brillante centrale et deux séries de spectres plus étalés que ceux du réseau à mailles parallèles, on voit dans les quatre angles droits une multitude de petits spectres rayonnant vers le centre. Newton avait entrevu l'identité des phénomènes de diffraction par les petites ouvertures et par les réseaux, comme il ressort de ce passage de son *Optique :* « En regardant le soleil au travers d'une

plume ou d'un ruban noir tenu tout près de l'œil, on verra plusieurs arcs-en-ciel, parce que les ombres que les fibres ou filets jettent sur la rétine sont bordées de pareilles franges colorées. » La figure 1 de la planche V représente l'effet produit par la diffraction de la lumière solaire à travers le réseau que forment les barbes d'une plume d'oiseau. On peut également observer des franges de même nature en regardant la lumière d'une bougie, les yeux presque fermés : les cils en se joignant forment alors les mailles d'un réseau irrégulier.

C'est encore par l'interférence des rayons lumineux que les physiciens expliquent les brillantes couleurs qu'on distingue sur certains corps dont la surface est couverte d'une multitude de stries très fines : les plumes de quelques oiseaux, la surface de la nacre de perle, sont formées d'une multitude de raies qui reflètent toutes les couleurs du prisme. Brewster, ayant eu l'occasion de fixer de la nacre de perle à un goniomètre avec un ciment de résine et de cire, fut tout surpris de voir la surface de la cire brillant des couleurs prismatiques de la nacre; il répéta l'expérience avec diverses substances, du réalgar, du métal fusible, du plomb, de l'étain, de la colle de poisson : toujours il vit apparaître les mêmes couleurs. Un Anglais, John Barton, eut l'idée d'appliquer cette propriété des surfaces striées : il tailla à facettes très fines des boutons d'acier et divers bijoux qui, à la lumière du soleil, du gaz ou des bougies, laissaient voir des dessins brillant de toutes les nuances du prisme. « Ces couleurs, dit Brewster, sont à peine surpassées par les feux du diamant. »



Fig. 178. — Stries de la nacre de perle, vues au microscope.

Voici encore un fait d'observation qui paraît se rattacher aux

phénomènes d'interférence, ainsi que l'a expliqué M. Babinet. En voici la description d'après M. A. Necker :

« Pour jouir de la vue de ce phénomène, dit-il, il faut être placé au pied d'une colline interposée entre l'observateur et la place où le soleil se couche ou se lève. On est ainsi complètement dans l'ombre; le bord supérieur de la colline ou montagne est couvert de bois, ou d'arbres et de buissons détachés, qui se projettent en noir sur un ciel parfaitement clair et brillant, sauf la place même à laquelle le soleil est sur le point de paraître ou vient de disparaître. Là, tous les arbres et les buissons qui bordent la sommité, dans leur totalité, branches, feuilles, troncs, etc., paraissent d'une blancheur vive et pure, et brillent d'une lumière éclatante, bien que projetés sur un fond qui est lui-même lumineux et brillant, comme l'est toujours la partie du ciel voisine du soleil. Les moindres détails des feuilles, des petits rameaux sont conservés dans toute leur délicatesse, et on dirait des arbres et des forêts faits de l'argent le plus pur, avec tout l'art de l'ouvrier le plus habile. Les hirondelles et autres oiseaux qui traversent en volant cette même région paraissent comme des étincelles de la blancheur la plus éclatante. »

Pour celui qui sait observer, on le voit, la nature est d'une magnificence que l'habileté des expérimentateurs les plus ingénieux ne dépasse jamais. Ce qui fait le mérite du savant, ce n'est pas tant de la reproduire, de multiplier les phénomènes dont elle nous offre le tableau; c'est, à force de patience, de sagacité, de génie, de découvrir les raisons des choses, les lois de leurs manifestations. A ce point de vue, l'histoire de la physique est certainement l'un des plus beaux titres de gloire de l'esprit humain.

§ 4. ANNEAUX COLORÉS DANS LES LAMES MINCES.

Les phénomènes les plus brillants, les plus merveilleux, ne sont pas toujours ceux qui exigent, pour être reproduits, les

appareils les plus coûteux ni les plus compliqués, ni le plus de mise en scène. Qui de nous, dans son enfance, ne s'est amusé à gonfler et à lancer dans l'air, à l'aide d'un peu d'eau de savon, d'un tuyau de plume ou de paille, ces bulles légères, à la forme si belle et si pure, aux couleurs si délicates et si variées?

A l'origine, quand la sphère liquide n'a encore qu'un faible diamètre, la pellicule qui en limite les contours est incolore et transparente. Peu à peu, l'air qu'on insuffle à l'intérieur, pressant également de toutes parts la surface concave, agrandit le diamètre aux dépens de l'épaisseur : c'est alors qu'on voit apparaître, faibles d'abord, puis plus vives, une série de couleurs naissant les unes à la suite des autres, et formant par leur mélange une multitude de teintes irisées, jusqu'au moment où la bulle, diminuant d'épaisseur, n'offre plus une résistance suffisante à l'action du gaz qu'elle renferme. Des taches noires se montrent alors au sommet, et bientôt la bulle crève. C'est cette dernière période du phénomène que représente la planche VI; on y voit, à la partie supérieure de la sphère liquide, les taches noires qui annoncent sa prochaine disparition.

Cette expérience si simple, cette récréation enfantine, qui offre tant d'attraits aux yeux de l'artiste amoureux des couleurs, n'est pas moins belle ni moins intéressante aux yeux du savant. Newton en a fait l'objet de ses études et de ses méditations, et, depuis ce grand homme, les couleurs de la bulle de savon tiennent une place légitime parmi les plus curieux phénomènes de l'optique. Ce n'est d'ailleurs qu'un cas particulier de toute une série de phénomènes qu'on observe toutes les fois que la lumière est successivement réfléchie et réfractée sur les surfaces qui limitent les lames minces des corps transparents. Les solides, les liquides et les gaz sont également propres à ce genre d'expérience. Les cristaux que le clivage réduit en lamelles d'une faible épaisseur, comme le mica, le gypse, le talc, le verre soufflé en boules extrêmement minces, la surface de l'acier recuit que recouvre une couche d'oxyde,

laissent voir des couleurs irisées tout à fait semblables à celles de la bulle de savon. Les vives nuances qui décorent les ailes membraneuses des libellules, celles qu'on aperçoit sur les morceaux de verre longtemps exposés à l'humidité, à la surface des eaux grasses, appartiennent à la même série de phénomènes. On les étudie, en physique, sous la dénomination commune d'*anneaux colorés dans les lames minces*.

Avant de dire quelle est la cause de cette décomposition de la lumière en ses couleurs simples, essayons de donner une idée des conditions dans lesquelles elle se produit, et des lois qui président à la succession de ces nuances, au premier abord si changeantes et si mobiles.

Suivons Newton dans ses mémorables expériences. Le point de départ du grand physicien fut l'observation suivante :

« Ayant pressé fortement, dit-il dans son *Optique*, deux prismes l'un contre l'autre, pour faire que leurs côtés (qui par hasard étaient tant soit peu convexes) pussent se toucher l'un l'autre, j'aperçus que l'endroit par où ils se touchaient devenait tout à fait transparent, comme s'ils n'eussent été, en cet endroit-là, qu'une seule pièce de verre. Car, lorsque la lumière tombait si obliquement sur l'air compris entre les deux prismes qu'elle était totalement réfléchie, il semblait qu'à l'endroit du contact elle était entièrement transmise. En regardant en ce point, on y voyait comme une tache noire et obscure, semblable à un trou, au travers duquel les objets placés au delà apparaissaient distinctement. »

Newton, ayant fait tourner les prismes autour de leur axe commun, vit peu à peu apparaître autour de la tache transparente une suite d'anneaux alternativement brillants et obscurs, colorés de diverses nuances. Pour mieux se rendre compte de la production de ces anneaux, il employa deux verres, l'un plan, l'autre convexe sur ses deux faces (fig. 179), tous deux d'un grand rayon de courbure. Puis il les appliqua l'un contre l'autre, la face convexe sur la face plane, en les pressant doucement : dans cette position les deux verres laissaient entre eux,



B Desgoffe pinx M Rapine sc

LA BULLE DE SAVON

Phénomènes d'Interférence

ANNEAUX COLORÉS DANS LES LAMES MINCES

tout autour du point central de contact, un ménisque très mince, une lame d'air dont l'épaisseur, nulle d'abord, allait en croissant insensiblement. Voici les phénomènes qu'il observa :

En recevant la lumière réfléchie dans une direction à peu près normale à la surface plane de la lame d'air, il vit se former autour du point de contact une suite d'anneaux de diverses couleurs, concentriques et de plus en plus serrés à mesure qu'ils s'éloignaient du centre. Chaque couleur apparaissait d'abord comme

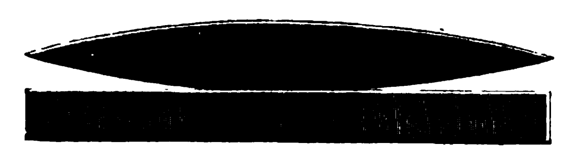


Fig. 179. — Lame mince comprise entre deux verres, l'un plan, l'autre convexe. Expérience des anneaux colorés de Newton.

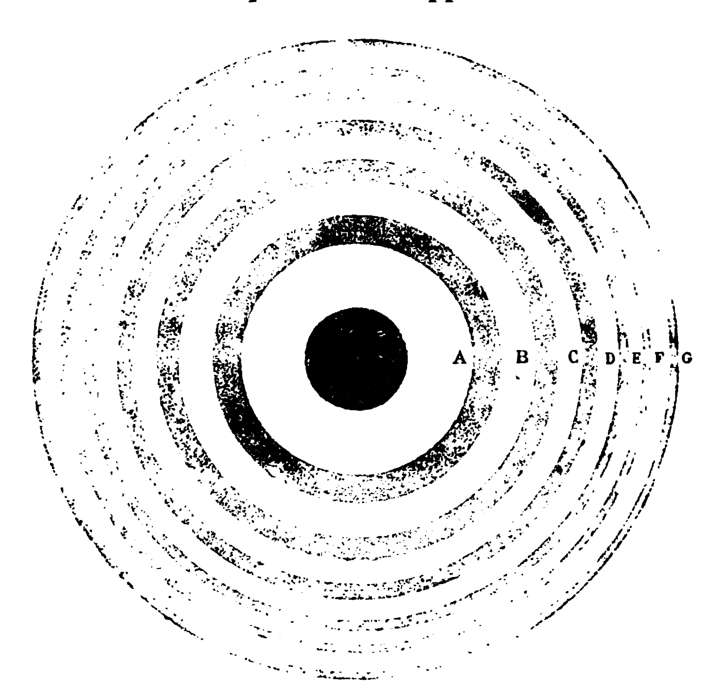


Fig. 180. — Anneaux colorés de Newton.

un cercle de teinte uniforme qui s'élargissait par la pression jusqu'à ce qu'une couleur nouvelle, sortant du centre, transformât la première en un anneau coloré. Au centre même apparut en dernier lieu une tache noire.

Voici quels furent alors l'ordre et les couleurs des anneaux, que représente la figure 180. Les couleurs sont indiquées à partir du centre O.

De O en A noir, bleu, blanc, jaune, rouge;
A — B violet, bleu, vert, jaune, rouge;
B — C pourpre, bleu, vert, jaune, rouge;
C — D vert, rouge;
D — E bleu-verdâtre, rouge;
E — F bleu-verdâtre, rouge pâle;
F — G bleu-verdâtre, blanc-rougeâtre.

Si, au lieu de recevoir la lumière réfléchie sur les deux surfaces de la lame mince, on regarde au travers du système des deux verres la lumière du ciel, on aperçoit encore une série d'anneaux colorés, mais leurs couleurs sont plus faibles que celles des anneaux vus par réflexion. De plus, l'ordre des couleurs est entièrement différent, et, au lieu d'une tache noire au centre, c'est une tache blanche qui apparaît. Voici la série des diverses teintes formant les anneaux vus par transmission :

Blanc, rouge-jaune, noir, violet, bleu;
Blanc, jaune-rouge, violet, bleu;
Vert, jaune-rouge, vert-bleu, rouge;
Vert-bleuâtre;
Rouge, vert-bleuâtre;
Rouge.

En comparant cette seconde série à la première, on voit que les teintes qui occupent le même ordre dans les deux systèmes d'anneaux sont précisément complémentaires, de sorte que la lumière transmise et la lumière réfléchie en un même point de la lame d'air, réunies, donnent de la lumière blanche. Cette conséquence des deux expériences a été vérifiée par Young et Arago, qui, ayant placé les deux verres de façon que les lumières réfléchies et transmises vinssent à l'œil à la fois et avec la même intensité, virent les anneaux disparaître.

Newton se servit pour observer les anneaux des diverses lumières simples du spectre. Dans ce cas, il aperçut, par ré-

flexion, des anneaux alternativement noirs et lumineux, ces derniers présentant la teinte de la lumière simple employée. Mais les diamètres des anneaux variaient de grandeur, selon la couleur de la lumière : ils se dilataient en passant du violet au rouge. On comprend alors comment il se fait que les anneaux obtenus avec la lumière blanche sont irisés. Les différentes couleurs, dont la lumière blanche est formée, produisent chacune leurs séries d'anneaux; mais comme les dimensions sont différentes, la superposition n'est pas exacte, les anneaux obscurs disparaissent, parce qu'ils sont recouverts par diverses nuances de lumière, au centre excepté, et là seulement où ces nuances se mélangent dans une proportion convenable, apparaît l'unique anneau de lumière blanche précédemment observé. En interposant de l'eau entre les verres, les anneaux apparaissent encore, mais plus petits, plus resserrés et de nuances plus faibles. Enfin, si, au lieu d'un milieu gazeux ou liquide, c'est le vide qui forme la lame mince entre les deux verres, on voit aussi des anneaux colorés, n'offrant aucune différence sensible avec ceux que donne l'air.

Newton, avec sa sagacité et sa précision accoutumées, ne s'est point borné à la constatation de ces faits et d'autres dans le détail desquels nous ne pouvons entrer : il chercha la loi de la production des anneaux, et c'est ainsi qu'il parvint à rattacher au même principe les phénomènes variés que nous avons décrits au début de ce chapitre, les couleurs irisées des bulles de savon et des lames minces de tous les corps solides, liquides ou gazeux. Il mesura avec soin les diamètres des anneaux successifs obtenus avec la lumière simple, au moment où la tache noire du centre indiquait qu'il y avait contact entre les verres. Il en déduisit, par les rapports géométriques qui lient les diamètres aux épaisseurs de la lame mince, ces épaisseurs mêmes, et il en conclut les lois suivantes :

Les carrés des diamètres des anneaux brillants, vus par réflexion, sont entre eux dans le rapport des nombres impairs, 1, 3, 5, 7, 9....

Les carrés des diamètres des anneaux obscurs sont comme les nombres pairs, 2, 4, 6, 8....

Quant aux anneaux vus par transmission, comme ils occupent des positions précisément inverses, chaque anneau obscur étant remplacé par un anneau brillant, chacun de ceux-ci par un anneau obscur, leurs diamètres suivent évidemment les mêmes lois, ou les séries des nombres seraient interverties.

Voilà pour les dimensions relatives des anneaux brillants et des anneaux obscurs. Quant aux épaisseurs de la lame d'air comprise entre les verres, elles vont naturellement en croissant du centre de contact vers les extrémités ; mais si l'on cherche les valeurs qui correspondent aux anneaux des divers ordres, on trouve que ces valeurs sont entre elles *comme les nombres impairs* pour les anneaux lumineux, et *comme les nombres pairs* pour les anneaux noirs ou obscurs.

Ces lois, si simples, sont générales. Newton en inféra que le phénomène des anneaux colorés dépend de l'épaisseur variable de la lame mince interposée entre les deux verres, de la nature de la substance dont elle est composée, nullement des verres entre lesquels elle se trouve comprise. Il chercha à le rattacher à la théorie de l'émission de la lumière, en imaginant que les rayons lumineux subissent, en se propageant, des changements périodiques qui tantôt les rendent aptes à être réfléchis, tantôt les rendent aptes à être transmis. C'est la théorie connue dans la science sous le nom de théorie des accès, accès de facile réflexion, accès de facile transmission, dont nous avons parlé déjà dans le chapitre précédent.

Aujourd'hui que la théorie des ondulations a prévalu, les anneaux colorés s'expliquent de la façon la plus simple par le principe des interférences. Un rayon de lumière qui pénètre jusqu'à la première surface de la lame est en partie réfléchi, en partie transmis jusqu'à la seconde surface, où il se réfléchit de nouveau. Les deux rayons voisins ainsi réfléchis sur chaque surface interfèrent, c'est-à-dire, comme nous l'avons vu plus haut, se détruisent ou s'ajoutent, selon que le retard du second

équivaut à un nombre impair de demi-longueurs d'onde ou à un nombre pair de ces mêmes longueurs. De là, obscurité dans le premier cas, lumière, au contraire, dans le second, ou bien, anneaux obscurs, anneaux lumineux. L'analyse, appliquée à ce cas si intéressant de la théorie des ondes, fait retrouver les lois des diamètres et celles des épaisseurs, telles que Newton les constata le premier par l'expérience. Comme les longueurs d'onde varient selon la nature de la lumière simple, et diminuent du rouge au violet, on voit que les anneaux de cette dernière couleur devaient être plus resserrés que les anneaux rouges. Maintenant, comment cette théorie est-elle applicable au phénomène des couleurs des bulles de savon, couleurs si variables, si mobiles et qui continuellement se mélangent et se fondent les unes dans les autres ? C'est encore Newton qui montra l'identité des anneaux colorés obtenus avec les verres et des anneaux qu'on voit apparaître sur les bulles.

Pour étudier ceux-ci, il prit soin de mettre la bulle de savon soufflée à couvert de l'agitation de l'air extérieur qui, faisant varier irrégulièrement l'épaisseur, semble pousser leurs couleurs l'une dans l'autre, et empêche d'en faire le sujet d'une observation exacte. « Aussitôt, dit-il, que j'en avais élevé une, je la couvrais d'un verre fort transparent ; et par ce moyen, ses différentes couleurs paraissaient dans un ordre très régulier, comme autant d'anneaux concentriques qui entouraient le haut de la bulle. » Quand on prend ces précautions, on voit les anneaux colorés apparaître au sommet de la bulle, se dilatant lentement à mesure que l'écoulement de l'eau vers le bas de la sphère liquide rend celle-ci plus mince, et, après être descendus jusqu'au bas, disparaître chacun à son tour. La figure 181 montre la disposition de ces bandes colorées. Le phénomène, ainsi régularisé, perd de sa beauté aux yeux de l'artiste, mais on conçoit qu'il gagne en intérêt au point de vue de la science. Dans la planche VI on aperçoit, malgré l'irrégularité des couleurs et leur mélange, les zones de plusieurs anneaux. Peu à peu la bulle devient si mince au sommet, que

la tache noire fait son apparition, souvent mêlée de plusieurs taches plus petites et plus sombres. Presque aussitôt la sphère éclate et disparaît.

Voici, selon Newton, l'ordre exact des anneaux colorés tels qu'on les voit se succéder depuis la première coloration de la bulle jusqu'à sa disparition : Rouge, bleu; rouge, bleu; rouge, bleu; rouge, vert; rouge, jaune, vert, pourpre; rouge, jaune, vert, bleu, violet; rouge, jaune, blanc, bleu, noir.

Or, si l'on compare cette série avec celle des couleurs des anneaux obtenus avec les deux verres de la première expérience, on reconnaît qu'elles sont exactement rangées en ordre inverse. Et cela devait être, si c'est la même cause qui produit les mêmes effets. A l'origine, la bulle est trop épaisse pour qu'il y ait apparition de couleurs; elle est incolore. Puis son épaisseur diminue de plus en plus, de sorte que c'est à la fin du phénomène que le noir correspondant à la plus faible épaisseur doit apparaître, exactement comme la tache noire des premiers anneaux se trouve au point où les deux verres sont en contact.

Dans tout ce que nous venons de dire, il s'agit des couleurs vues par réflexion. La bulle, une fois formée, doit être observée de telle sorte qu'elle réfléchisse vers l'œil la lumière d'un ciel blanchâtre, et, pour mieux distinguer les anneaux et les couleurs, on met par derrière un fond noir. Mais on peut aussi observer la bulle de savon en regardant au travers la lumière du ciel. Des anneaux colorés se forment encore; mais ils sont d'un éclat plus faible, et leurs couleurs successives sont complémentaires de celles que donne la lumière réfléchie. Il est facile de s'assurer de ce fait, que nous avons déjà remarqué dans les anneaux obtenus à la surface de deux verres. Si, pendant qu'on regarde la bulle par la lumière des nuées réfléchie dans l'œil, la couleur de sa circonférence est rouge, au même instant un second observateur, regardant les nuées à travers la bulle, trouvera que sa circonférence est bleue. Au contraire, si le contour de la bulle est bleu par une lumière réfléchie, il semble rouge par une lumière transmise.

Maintenant il est aisé de comprendre pourquoi la bulle de savon observée à l'air libre présente dans les couleurs irisées de sa surface cette irrégularité, cette mobilité, ce perpétuel mélange de teintes qui en font un des plus beaux phénomènes dus à la décomposition de la lumière par interférence. L'agitation de l'air tout autour de la bulle, jointe au défaut d'homogénéité de l'eau de savon en divers points, et à l'évaporation qui se fait d'une manière très inégale, produit dans la pellicule liquide une multitude de courants, qui, contrariant en tous sens l'action de la pesanteur, empêchent l'eau de descendre par zones régulières vers le bas de la bulle. Son épaisseur varie d'un point à un autre en divers sens, et comme c'est de cette épaisseur que dépend la production des diverses teintes, celles-ci se répartissent de la façon la plus variée. Au contraire, dans un flacon fermé, l'air étant saturé de vapeur d'eau, l'évaporation et l'agitation de l'air n'existent plus, et les anneaux apparaissent avec la régularité qu'indique le calcul.



Fig. 181. — Anneaux colorés des laines minces Bulle de savon.

Nous oubliions de dire que les lois trouvées par Newton pour les anneaux fournissent un moyen de calculer l'épaisseur de la lame liquide, dans les endroits où telle couleur apparaît. C'est aux points où l'on voit les taches noires se montrer que cette épaisseur est minimum : elle est alors environ de la dix-mil-

lième partie d'un millimètre. Il résulte de là que, si l'on pouvait former une bulle de savon qui n'eût partout que cette épaisseur, elle serait totalement invisible.

§ 5. THÉORIE DES ONDULATIONS. — RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

On a vu dans le § 2 du chapitre précédent, comment Newton, dans le système de l'émission, rend compte des phénomènes de la réflexion et de la réfraction. Essayons de donner une idée de la façon dont se passent les choses dans le système des ondes.

L'explication complète de ces phénomènes repose sur deux principes, qu'on nomme, l'un le *principe de Huygens* ou *des ondes enveloppes*, l'autre *le principe des interférences*, que nous avons exposé d'après Th. Young et Fresnel, au début de ce chapitre.

Nous ne pouvons, dans un ouvrage aussi élémentaire que l'est celui-ci, avoir la prétention de développer, dans leur rigueur, la suite des considérations et des démonstrations nécessaires pour comprendre l'explication théorique des principaux phénomènes de l'Optique. Néanmoins il nous paraît possible d'en faire au moins saisir le lien.

Le principe de Huygens consiste en ce que le mouvement d'une onde lumineuse dans ses développements successifs peut être considéré à chaque instant, en un point quelconque de sa surface, comme la résultante du mouvement antérieur. Voici la définition précise qu'en donne Fresnel : « *Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points peuvent être regardées comme la somme des mouvements élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément, toutes les parties de cette onde considérées dans une quelconque de ses positions antérieures.* » O étant (fig. 182) le point lumineux d'où émanent les ondes successives, considérons l'une de ces ondes lorsqu'elle est arrivée en AB. Au bout d'un temps donné, elle se sera propagée ou transportée jusqu'en A′B′. D'après le principe de Huygens, le mouvement vibratoire de chacun des

points de la surface de l'onde A′ B′ peut être considéré soit comme provenant directement du point lumineux, soit comme déterminé par l'action isolée des points de l'onde AB, dont chacun est regardé comme un centre d'ébranlement. Toutes les ondes élémentaires émanées des points de AB, tels que *mn*, sont sphériques, puisque le milieu est supposé homogène, et elles ont pour enveloppe commune l'onde A′ B′.

Ce principe suffisait à Huygens pour expliquer les lois de la réflexion et de la réfraction telles que les établit l'expérience, mais la théorie restait incomplète, et c'est à Fresnel qu'on doit de l'avoir rigoureusement achevée, en faisant intervenir, ainsi qu'on va le voir, le principe de l'interférence des ondes lumineuses.



Fig. 182. — Principe d'Huygens, ou des ondes enveloppes.

Nous prendrons pour guide Fresnel lui-même, non dans la démonstration générale rigoureuse qu'il a donnée de la réflexion et de la réfraction dans le système des ondes, mais dans l'exposé plus élémentaire et plus simple qu'il en a fait pour le supplément à la Chimie de Thomson.

« Soient ED et FG deux rayons incidents partis du même centre d'ondulation, que je suppose à une distance infinie, en sorte que ces rayons sont parallèles entre eux ; soit AB la surface réfléchissante ; menons par le point G la ligne droite GI, perpendiculaire aux rayons ED et FG : ce sera la direction de l'onde incidente, au moment où elle vient rencontrer en G la surface réfléchissante. D'après le principe de Huygens, nous pouvons considérer chacun des points successivement ébranlés, G et D, par cette onde, comme étant eux-mêmes des centres d'ébranlement, qui, en agissant isolément, enverraient des

rayons dans une infinité de directions et avec des intensités différentes. Il serait sans doute bien difficile de découvrir la loi des variations de leur intensité autour du point rayonnant; mais heureusement nous n'en avons pas besoin; car, quelle que soit cette loi, il est évident que les rayons élémentaires partis des points G et D, qui suivront des directions parallèles, étant absolument dans des cas semblables, devront avoir la même intensité et la même direction de mouvement oscillatoire. Or ce principe nous suffit pour juger suivant quelle direction peuvent se propager les vibrations résultantes de la réunion des rayons élémentaires. En effet, considérons l'onde réfléchie à une distance infiniment grande de AB relativement à l'intervalle GD et autres intervalles du même ordre: soient GK et DL deux rayons élémentaires réfléchis, concourant vers un même point de cette onde; ils seront parallèles, à cause de la distance infinie à laquelle il est situé. Supposons l'angle KGB égal à l'angle EDA; il est clair que les vibrations apportées par les rayons GK et DL à leur point de concours seront parfaitement d'accord. En effet, à cause de l'égalité de ces angles, si du point D on abaisse sur GK la perpendiculaire DC, les deux triangles GCD et IDG seront égaux, et par conséquent GC sera égal à ID. Or ID est la portion de chemin que le rayon incident ED a parcouru de plus que FG pour arriver à la surface; et GC est la portion de chemin que le rayon réfléchi en G doit parcourir de plus que celui qui est réfléchi en D, pour arriver à leur point de concours; donc, lorsqu'ils y seront arrivés, ils auront parcouru en somme la même longueur de chemin, et par conséquent y vibreront d'accord[1].

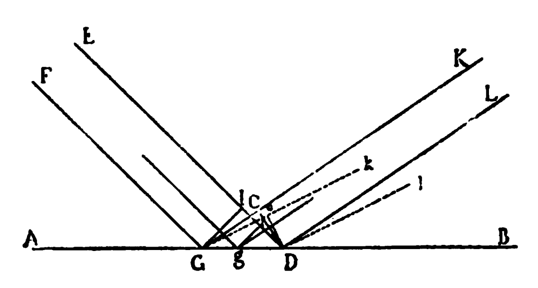


Fig. 183. — Théorie de la réflexion dans le système des ondes.

1. On peut dire aussi que tous les rayons du faisceau compris entre FG et ED, après avoir touché les différents points de la surface réfléchissant de G à D, arriveront à la fois sur la

« Mais il n'en est plus ainsi quand la direction des rayons élémentaires Gk et Dl, que je suppose aussi concourir vers un point infiniment éloigné, fait avec la surface un angle qui n'est pas égal à EDA ; car alors l'intervalle Gc, compris entre le point G et le pied de la perpendiculaire Dc, n'étant plus égal à ID, les chemins parcourus par les rayons, pour arriver au point de concours, ne sont plus égaux, et leurs vibrations en ce point doivent être plus ou moins discordantes. Or on peut toujours prendre le point G à une distance telle du point D, que la différence entre Gc et ID soit égale à une demi-ondulation : ce qui établira une discordance complète, au point de concours, entre les vibrations réfléchies suivant Gk et Dl ; et comme elles sont d'ailleurs d'intensités égales, elles se détruiront mutuellement, et par conséquent il n'y aura pas de lumière propagée dans cette direction. »

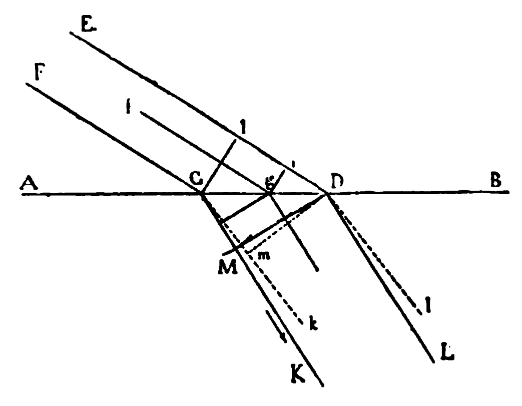


Fig. 184. — Théorie de la réfraction.

Les mêmes principes servent à l'explication des lois de la réfraction, c'est-à-dire de la direction que doivent prendre les ondes lumineuses, lorsqu'elles arrivent à la surface de séparation AB (fig. 184) de deux milieux dans lesquels la lumière ne se propage pas avec la même vitesse. En considérant deux rayons incidents parallèles FG, ED, qui arrivent simultanément en G et en I, on voit que le second aura à parcourir de plus que l'autre le chemin ID pour arriver à la surface. Prenant maintenant les deux rayons réfractés parallèles GK, DL, partant des

droite CD qui sera l'enveloppe de toutes leurs ondes élémentaires et formera l'onde réfléchie. C'est à ce point que s'arrêtait la démonstration d'Huygens, il restait à démontrer, comme le fait Fresnel, que tous les rayons réfléchis dans d'autres directions se détruisent par interférence, et qu'ainsi il n'y a de lumière sensible que suivant la direction que donne la loi de la réflexion. La même remarque s'appliquera plus loin à la démonstration de la réfraction.

mêmes points G et D de la surface, il est clair que, pour arriver simultanément et d'accord à leur point de concours (supposé à l'infini), le premier aura à parcourir de plus que le second le chemin GM. Si donc le chemin GM et le chemin IG sont précisément entre eux dans le même rapport que les vitesses de la lumière dans le second et dans le premier milieu, les deux rayons arriveront l'un en M et l'autre en D en même temps, et les deux rayons réfractés GK, DL resteront parfaitement d'accord pendant toute leur marche et arriveront ainsi au point de concours. La même condition se trouvera évidemment remplie par tous les autres rayons élémentaires partis des divers points de la surface AB qui concourent au même point : leurs ondulations se superposeront exactement et s'ajouteront les unes aux autres.

Ainsi les rayons qui auront pénétré dans le second milieu suivant une direction telle, que les perpendiculaires ID, GM soient dans le même rapport que les vitesses de la lumière dans les deux milieux, produiront de la lumière par leur concours. Or ID est le sinus de l'angle de réflexion ; GM est le sinus de l'angle de réfraction, et l'on voit que, dans la théorie des ondes, leur rapport est constant : c'est la loi même de la réfraction, telle que la donne l'observation.

Ici encore, Fresnel va plus loin que n'allait Huygens. Il ne se borne pas à faire voir que l'onde incidente et l'onde réfractée ont des directions angulaires dont les sinus varient dans un rapport constant. S'appuyant sur le principe des interférences, il fait voir que dans toute autre direction deux rayons tels que G*k* et D*l* ne sont plus d'accord : quand l'un part du point D, l'autre n'est pas encore arrivé en *m*, il y a discordance, et comme on peut toujours prendre deux rayons voisins tels que leur différence de marche soit d'une demi-ondulation, il en résulte nécessairement qu'ils interfèrent et se détruisent et qu'il n'y a pas de lumière propagée dans leur direction.

Ainsi la théorie des ondes rend parfaitement compte des lois de la réflexion et de la réfraction, sans faire intervenir aucune

hypothèse autre que celle de la constitution même des ondulations que provoquent, au sein d'un milieu éminemment élastique, les vibrations périodiques des molécules des sources lumineuses.

C'est ici le moment d'insister sur un point capital qui différencie radicalement la théorie de l'émission et celle des ondes. Newton, expliquant la réfraction par une attraction qu'exercent les milieux denses sur les molécules de la lumière, est obligé d'admettre que la vitesse de propagation de la lumière est plus grande dans ces milieux. Ainsi, dans l'eau elle devrait être plus grande que dans l'air. Dans la théorie des ondulations, la conséquence est toute contraire, ainsi qu'on vient de le voir. En nous reportant à la figure 184, les lignes ID et GM qui représentent les sinus des angles d'incidence et de réfraction, expriment aussi les vitesses relatives de la lumière dans le premier et dans le second milieu. Or, si celui-ci est le plus réfringent, par exemple, si les rayons réfractés se rapprochent de la normale, il est évident que GM est plus petit que ID; en d'autres termes, que la lumière se propage avec moins de vitesse dans le milieu le plus réfringent.

L'expérience a prononcé sur ce point décisif. Nous avons rapporté les résultats obtenus séparément par M. Foucault et par M. Fizeau, et qui prouvent que la vitesse de la lumière dans l'eau est moindre que sa vitesse dans l'air.

La théorie de l'émission est donc, sous ce rapport, en contradiction manifeste avec l'expérience. Nous rencontrerons plus tard d'autres témoignages de son impuissance à expliquer certains phénomènes dont la théorie des ondes, au contraire, rend victorieusement compte.

CHAPITRE XIII

DOUBLE RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

§ 1. PHÉNOMÈNES DE DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A UN AXE.

Érasme Bartholin, savant médécin danois qui vivait à Copenhague vers le milieu du dix-septième siècle, ayant eu l'occasion d'examiner des cristaux qu'un de ses amis lui avait rapportés d'Islande, fut fort surpris de voir que les objets paraissent doubles quand on les observe au travers de cette substance. C'est en 1669 qu'il constata ce singulier phénomène et qu'il en décrivit, dans un mémoire spécial, toutes les circonstances. Vingt ans après, Huygens reprenait à nouveau l'étude de ce qu'on a nommé depuis la *double réfraction*, en formulait les lois, et en donnait la théorie d'après les principes du système des ondulations, dont ce grand homme avait jeté les premiers fondements.

Depuis la découverte de Bartholin et les observations d'Huygens (qui reconnut la même propriété dans le quartz), les phénomènes de même nature ont été étudiés sous toutes leurs faces, et leur ensemble forme aujourd'hui toute une branche de l'optique. Avant de décrire les principaux d'entre eux, rappelons ce qui se passe quand un faisceau de lumière tombe sur la surface d'un milieu transparent comme l'eau ou le verre.

En arrivant à la surface, une partie du faisceau lumineux est réfléchie régulièrement, de manière à donner une image de l'objet d'où il émane; une autre portion est réfléchie irrégu-

lièrement dans tous les sens. Voilà pour la lumière qui revient sur ses pas, ou, si l'on veut, qui change de route sans changer de milieu. L'autre partie du rayon de lumière pénètre dans la substance transparente, où elle se propage sans changer de direction si l'incidence est normale, où elle est réfractée, c'est-à-dire déviée, si le rayon tombe obliquement sur la surface. Mais dans les deux cas le rayon reste simple; il est simple encore quand il sort du milieu transparent, de sorte que l'œil qui le reçoit voit une image unique de la source lumineuse. Eh bien, les choses ne se passent pas toujours ainsi. Il est des substances à travers lesquelles un rayon de lumière se comporte d'une autre façon, où il se dédouble, et laisse voir, comme Bartholin l'a signalé pour la première fois, deux images de l'objet au lieu d'une seule.



Fig. 185. — Échantillon de spath d'Islande.

On rencontre dans les filons et les calcaires métamorphiques, dans les argiles compactes, un minéral qui cristallise en forme de rhomboèdre solide à six faces parallélogrammes, très transparent, incolore, et dont la composition chimique indique un carbonate de chaux avec quelques parties de protoxyde de manganèse. C'est d'Islande que viennent les plus beaux échantillons, qui atteignent jusqu'à 10 centimètres d'épaisseur : aussi le minéral dont nous parlons est-il connu sous le nom de *cristal* ou de *spath d'Islande* (fig. 185).

Les cristaux de cette espèce se clivent avec la plus grande facilité sur toutes leurs faces, de sorte qu'on peut leur donner une forme rigoureusement géométrique, plus commode pour l'étude de leurs propriétés optiques. Le rhomboèdre est alors formé de six losanges égaux entre eux.

Chacun de ces losanges a deux angles obtus mesurant 101°55', et deux angles aigus de 78°5'. Des huit angles solides qui forment les sommets du cristal, six sont composés d'un angle obtus et de deux angles aigus : les deux autres, de trois angles obtus. Imaginons qu'on joigne ces deux derniers par une ligne droite : cette diagonale du rhomboèdre a une grande importance au point de vue des phénomènes qui vont nous occuper ; c'est elle qu'on nomme — nous verrons bientôt pourquoi — l'*axe optique* du cristal[1].

Décrivons maintenant les phénomènes de double réfraction, tels qu'on les peut facilement observer à l'aide d'un échantillon de spath d'Islande.

Prenons un morceau de ce cristal. Posons-le sur une ligne



Fig. 186. — Images doubles des objets vus à travers un cristal de spath d'Islande.

d'écriture, et regardons au travers (fig. 186) ; nous sommes témoin du phénomène qui avait frappé Bartholin. Chaque lettre est doublée. Notons en outre que chaque image isolée est moins noire que la lettre même : elle a pris une teinte grisâtre, et ce qui prouve que cela ne tient point à l'absorption de la lumière par le cristal, c'est que la teinte est noire partout où il y a superposition de deux images. Les arêtes du cristal lui-même vues par réfraction paraissent doubles : une ligne droite tracée sur le papier se divise en deux lignes parallèles. Faisons tomber un faisceau de lumière solaire sur l'une des faces ; le rayon

1. L'axe optique ne doit pas être regardé comme une ligne unique. Il y a, dans un cristal, autant d'axes jouissant de cette même propriété que de lignes parallèles à la direction de la diagonale du rhomboèdre. En d'autres termes, ici *axe* devient synonyme de direction, et si l'on dit du spath d'Islande que c'est un *cristal à un axe*, c'est qu'il n'y a qu'une seule direction pour laquelle la définition donnée plus haut soit exacte.

lumineux sort double, et va former sur un écran deux images différentes, dont la distance dépend de l'inclinaison du rayon incident sur la face du cristal.

Allons maintenant plus loin dans l'analyse du phénomène, et pour cela simplifions l'expérience, c'est-à-dire n'examinons à la fois qu'un point. Vu à travers le cristal, il paraît double. Faisons tourner le cristal sur lui-même, parallèlement aux faces d'incidence et d'émergence. Que voyons-nous?

L'une des images tourne autour de l'autre, et quand une circonférence entière est décrite par le cristal, l'image est venue se placer à sa position primitive, après avoir décrit un cercle autour de l'autre image immobile.

Quand, au lieu d'observer un point, on fait la même expérience sur une ligne droite, on remarque que, dans deux positions différentes du cristal, l'une des lignes, qui semble se mouvoir parallèlement à l'autre, atteint un écart maximum; dans deux autres positions, les deux images paraissent coïncider. Mais cette coïncidence n'est qu'apparente; car, si l'on a marqué un point sur la ligne observée, on voit la double image de ce point, alors même que les images parallèles des lignes sont superposées. Ainsi, la rotation d'une des images autour de l'autre a lieu, dans ce cas, comme dans le précédent.

Disons tout de suite qu'on donne le nom d'image *ordinaire* à l'image immobile, celui d'image *extraordinaire* à celle qui exécute sa rotation autour de la première. La raison en est que le rayon réfracté qui produit l'image immobile, suit dans sa route les lois de la réfraction simple, telles que les ont formulées Snellius et Descartes, tandis que l'autre rayon n'obéit pas aux mêmes lois[1]. Cette différence caractéristique des deux images peut être mise en évidence de plusieurs manières. Qu'on fasse tomber un rayon de lumière perpendiculairement à l'une des faces du cristal, il sera bifurqué en pénétrant à l'intérieur;

1. En un mot, d'une part, le rayon réfracté extraordinaire n'est pas en général dans le plan d'incidence; d'autre part, le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction ne reste pas constant.

mais l'un des rayons suivra la direction du rayon incident et ne sera pas réfracté non plus à son émergence : c'est le rayon ordinaire, celui qui obéit à la loi de Descartes. L'autre rayon sera dévié de la direction du rayon incident, et à son entrée dans le cristal et à sa sortie ; c'est le rayon qui produira l'image extraordinaire.

Quand l'incidence est oblique, les deux rayons sont réfractés; mais le rayon ordinaire est également dévié, quelle que soit la position du cristal, pourvu que les faces d'incidence et d'émergence conservent une direction parallèle à leur direction primitive ; en un mot, sa route est celle qu'il suivrait au travers d'un morceau de verre à faces parallèles. Il n'en est pas de même de l'autre rayon, de celui qui donne lieu à l'image extraordinaire, puisque cette image, nous l'avons vu, tourne autour de la première, si l'on fait tourner le cristal parallèlement à lui-même.

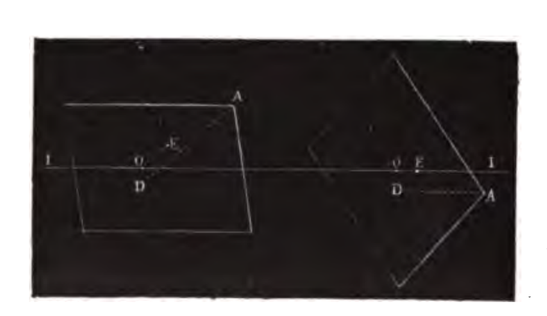


Fig. 187. — Positions de l'image extraordinaire par rapport au plan d'incidence. Section principale.

Il y a dans ce mouvement de l'image extraordinaire une circonstance qu'il faut noter. Le cristal étant posé sur une feuille de papier sur laquelle on a marqué un point, supposons l'œil placé dans le plan d'incidence. Le rayon réfracté ordinaire sera aussi dans ce plan, comme l'indique la loi de réfraction simple, et l'image ordinaire O du point sera sur la trace II du plan d'incidence avec le papier (fig. 187). Mais il n'en sera pas de même de l'image extraordinaire E, et la ligne qui joint les deux images OE fera un angle avec la trace dont nous parlons. Or on observe que cette ligne OE reste toujours parallèle, pendant le mouvement de rotation du cristal, à la bisectrice AD de l'angle obtus de la face parallèle au plan du papier. Aussi quand, grâce à ce mouvement, cette bissectrice est venue se placer parallèlement à II,

l'image extraordinaire est elle-même sur cette trace, et les deux rayons réfractés se trouvent tous deux dans le plan d'incidence.

Il y a donc, parmi les sections qui coupent le cristal perpendiculairement à l'une de ses faces, une section telle que, si le rayon incident s'y trouve contenu, le rayon extraordinaire

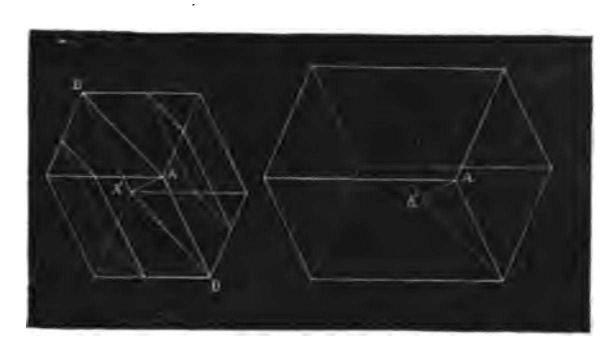


Fig. 188. — Sections principales et axe optique du spath d'Islande.

obéira à la première loi de la réfraction simple, tout comme l'autre rayon. On nomme ce plan *section principale.* Tout plan perpendiculaire à l'une des faces du spath d'Islande, et parallèle à la petite diagonale du losange, ou à la bissectrice de l'angle obtus, est une section principale de cette face.

Toute section principale est parallèle à l'axe optique, et cette condition est suffisante; de sorte que si l'on taillait une face artificielle dans le cristal, un plan quelconque mené perpendiculairement à cette face et parallèle à l'axe optique serait aussi une section principale de la face artificielle. Enfin, si l'on taille une face artificielle ABC perpendiculaire à l'axe optique NI, tout rayon tombant sur cette face sera nécessairement dans une section principale, et les deux rayons réfractés seront toujours dans le plan d'incidencé. Dans ce cas, l'observation fait voir que si le rayon incident est normal à la face artificielle, il n'y a



Fig. 189. — Section artificielle perpendiculaire à l'axe optique.

plus qu'un rayon réfracté. Voilà donc une direction pour laquelle le phénomène de la bifurcation disparaît : la double réfraction n'a plus lieu quand le rayon incident tombe parallèlement à l'axe optique.

Monge a fait une expérience singulière, d'ailleurs très facile à répéter, et qui va nous montrer quelle est la marche suivie dans le cristal par les faisceaux émanés d'un point lumineux, pour donner lieu aux deux images ordinaire et extraordinaire du point. Examinant la double image d'un point S (fig. 190), situé à quelque distance de la face inférieure, et avançant par-dessous cette face une carte opaque *ab*, il reconnut avec surprise que c'est l'image la plus éloignée de la carte qui disparaît la première. Voici comment on se rend compte du phénomène. Un faisceau lumineux incident SI se bifurque et donne deux pinceaux réfractés ; d'où, à la sortie de la face parallèle, deux pinceaux émergents qui divergent, et dont l'un seul peut dès lors pénétrer dans l'œil : supposons que ce soit celui qui produit l'image ordinaire O. Un faisceau incident, voisin du premier, donnera de même deux faisceaux émergents, dont l'un pénètrera dans l'œil et produira l'image extraordinaire E. Comme les faces du cristal sont parallèles, chaque faisceau émergent est composé de rayons parallèles à ceux du rayon incident. Il faut donc, puisque ceux qui produisent les images se rencontrent dans l'œil, que les faisceaux réfractés correspondants se croisent dans le cristal.



Fig. 190. — Croisement des faisceaux qui produisent l'image ordinaire et l'image extraordinaire.

Ainsi s'explique l'expérience de Monge ; la carte *ab* commence par intercepter le faisceau qui produit l'image la plus éloignée, et c'est dès lors cette image, c'est-à-dire l'image extraordinaire E, qui doit naturellement disparaître la première.

Telles sont les circonstances les plus remarquables qui constituent le phénomène de la double réfraction. Les lois qui régissent ce phénomène sont trop complexes pour que nous puissions les expliquer dans un ouvrage aussi élémentaire que le MONDE PHYSIQUE. Mais nous allons essayer de donner, en quelques lignes, une idée de la différence qui existe entre la simple et la double réfraction.



Fig. 191. — Cristal de roche.

Nous avons déjà dit que le faisceau ordinaire suit les deux lois de Descartes ; c'est-à-dire que le rayon réfracté est toujours dans le plan d'incidence, et que si l'on fait varier l'angle d'incidence, le rapport qui existe entre son sinus et celui de l'angle de réfraction est toujours constant. Le faisceau extraordinaire ne suit la première de ces lois que si le rayon incident est dans une section principale. Mais il ne suit pas du tout la seconde, de sorte que le rapport des sinus, ce qu'on nomme l'indice de réfraction, varie selon l'angle que le rayon incident fait avec l'axe optique du cristal. Cet angle est-il nul, ou le faisceau incident est-il parallèle à l'axe optique, dans ce cas seulement la réfraction double disparaît ; l'une des images se confond avec l'autre : il y a égalité entre les indices ordinaire et extraordinaire de réfraction. Plus l'angle croît, plus l'inégalité de ces indices va croissante, et elle est maximum si le faisceau incident a une direction perpendiculaire à l'axe optique. Dans le spath d'Islande, le seul cristal doué de la double réfraction que nous ayons examiné jusqu'ici, l'indice

de réfraction du rayon ordinaire est plus grand que celui du rayon extraordinaire. Le contraire a lieu si l'on considère certaines autres substances biréfringentes, telles que le cristal de roche. A quoi tient cette différence? Pour en donner la raison, il faudrait exposer la théorie entière de la réfraction simple et double dans le système des ondulations; montrer que la réfraction est causée par la différence de vitesse qu'éprouvent les ondes d'éther en passant d'un milieu dans un milieu plus réfringent; que le rayon ordinaire se comporte comme s'il se mouvait dans un milieu homogène non cristallisé, tandis que le rayon extraordinaire se propage avec plus ou moins de facilité, selon qu'il se meut dans telle ou telle direction relativement à l'orientation des molécules cristallines. Dans le spath d'Islande, c'est la vitesse du rayon extraordinaire qui est la plus grande; le contraire a lieu dans le cristal de roche.

De là les noms de cristaux *positifs* et de cristaux *négatifs* donnés aux substances qui jouissent de la double réfraction, selon qu'elles se rangent dans l'une ou dans l'autre catégorie, ayant pour type, les premières le cristal de roche, les autres le spath d'Islande.

La tourmaline, le rubis, l'émeraude sont des cristaux négatifs; le quartz — c'est le nom minéralogique du cristal de roche — le sulfate de potasse et de fer, l'hyposulfate de chaux, la glace, sont au nombre des cristaux positifs.

§ 2. DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A DEUX AXES.

La double réfraction se produit encore dans toute une classe de substances cristallines, que l'on désigne sous le nom de cristaux *à deux axes*. La topaze, l'arragonite, le sulfate de chaux, le talc, le feldspath, la perle, le sucre sont des cristaux à deux axes : il y a, dans chaque cristal de ce genre, deux directions différentes, suivant lesquelles le rayon passe sans se bifurquer; ces deux directions sont les *axes optiques* du cristal.

Mais il y a une différence essentielle entre les phénomènes de double réfraction dans les cristaux à un axe et ceux des cristaux à deux axes. Dans les premiers, l'un des deux rayons réfractés suit les lois de la réfraction simple; dans les autres, les deux rayons sont tous deux extraordinaires : aucun d'eux ne suit les lois de Descartes. Une expérience de Fresnel démontre le fait très simplement. On divise une topaze en plusieurs fragments ayant chacun la forme de lames à faces parallèles, mais taillés dans différents sens; puis, après avoir collé ces morceaux par leurs faces planes, on donne à l'ensemble la forme d'un parallélipipède. En regardant alors au travers une ligne droite parallèle à l'arête réfringente, on voit deux images de la ligne, et chacune de ces images est une ligne brisée dont les diverses portions correspondent aux fragments de la topaze : or, si l'un des systèmes de rayons réfractés suivait les lois de Descartes, l'image qui en résulterait serait une ligne droite, car la direction des rayons dans le prisme serait alors indépendante de la direction des axes optiques dans chaque morceau qui le compose. L'expérience prouve donc que les deux rayons sont tous les deux des rayons extraordinaires. Nous verrons bientôt (dans le § 3 du chapitre XIV) un autre moyen de distinguer les uns des autres les cristaux à un et à deux axes.

Terminons ce que nous avions à dire de la double réfraction en énumérant les milieux réfringents dans lesquels les phénomènes de cet ordre ne se manifestent pas, ou qui sont doués de la réfraction simple. Ce sont d'abord les gaz, les vapeurs et les liquides. Puis, parmi les substances qui ont passé de l'état liquide à l'état solide, celles dont les molécules n'ont pas pris d'arrangement cristallin régulier : tels sont le verre, la colle, la gomme, les résines; enfin les cristaux dont la forme primitive est le cube, l'octaèdre régulier, le dodécaèdre rhomboïdal. Il faut ajouter que les corps appartenant à ces deux dernières catégories peuvent acquérir la propriété de la réfraction double

quand on les soumet à des compressions ou à des dilatations violentes, ou bien encore quand on chauffe inégalement leurs diverses parties.

Certains solides appartenant au règne végétal ou au règne animal, la corne, la plume, la nacre, sont aussi doués de la double réfraction.

CHAPITRE XIV

POLARISATION DE LA LUMIÈRE

§ 1. POLARISATION DE LA LUMIÈRE PAR DOUBLE RÉFRACTION.

Quand on observe un objet lumineux au travers d'un cristal doué de la double réfraction, d'un rhomboèdre de spath d'Islande, je suppose, nous savons qu'on voit deux images distinctes, l'une dite ordinaire, suivant les lois de la réfraction simple, l'autre extraordinaire, dont nous avons indiqué les propriétés dans les paragraphes précédents. Cette dernière se reconnaît aisément, en ce qu'elle tourne autour de l'autre, quand on imprime au cristal un mouvement de rotation, dans un plan parallèle aux faces d'incidence et d'émergence des rayons. Il importe maintenant de remarquer que, dans toutes ces positions, l'intensité relative des deux images ne varie pas : l'éclat de chacune d'elles est moitié moindre que celui de l'objet lumineux, comme il est aisé de le constater par l'observation directe. Supposons qu'on examine un petit cercle blanc sur un fond noir. Partout où elles sont séparées, les deux images ordinaire et extraordinaire du point offrent une teinte grisâtre de même intensité, et l'éclat est égal à celui de l'objet là où les deux images se superposent. Enfin, le même phénomène a toujours lieu, quelles que soient les couleurs respectives de l'objet et du fond.

On fait encore la même expérience dans les cours, en laissant arriver un faisceau de lumière solaire sur le cristal et en rece-

vant les deux faisceaux réfractés sur une lentille convergente : les deux images vont se projeter sur un écran (fig. 192). Si l'on fait tourner alors le cristal parallèlement à la face d'incidence, les deux images se déplacent en décrivant chacune une circonférence de cercle, et l'on voit que, dans toutes les positions, il y a égalité dans leur intensité lumineuse. Si l'on fait en sorte que les deux images se superposent en partie, l'éclat des parties superposées sera double de celui que possèdent les parties séparées, comme on le voit dans la figure 193.

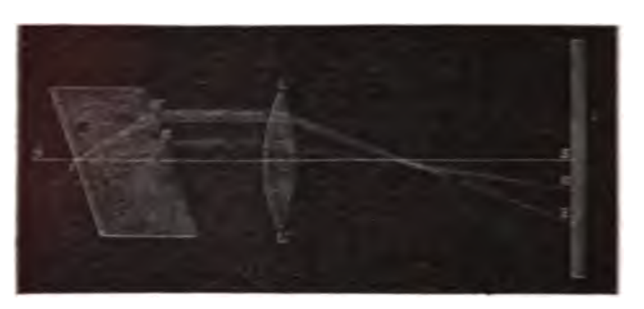


Fig. 192. — Propagation des images ordinaire et extraordinaire d'un cristal biréfringent. Égalité d'intensité.

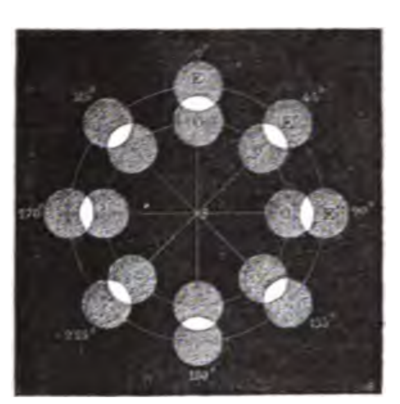


Fig. 193. — Égalité de l'intensité des images ordinaire et extraordinaire dans la double réfraction.

Une belle et ancienne expérience, due à Huygens, va nous prouver que les faisceaux qui émergent du spath d'Islande ont acquis de nouvelles et remarquables propriétés après leur déviation dans le milieu cristallisé, propriétés que n'avait point le faisceau lumineux avant son passage à travers le cristal. Cette expérience consiste à recevoir, après leur sortie du premier rhomboèdre, les rayons ordinaire et extraordinaire sur un second cristal, et à examiner les intensités relatives des images qui en résultent quand on fait varier l'orientation du second cristal autour de

chaque faisceau émergent. Voici un moyen très simple d'observer les phénomènes qui se produisent : c'est, du reste, celui qu'a employé Huygens lui-même.

Plaçons un premier cristal sur un point noir au milieu d'un fond blanc. Il y aura deux images d'égale intensité. Posons maintenant un second spath d'Islande sur le premier, et plaçons-le de façon que leurs sections principales coïncident; un des moyens de réaliser cette condition est de placer les faces de l'un parallèlement aux faces de l'autre : il n'y aura toujours que deux images, de même intensité qu'auparavant. Seulement les deux images, ordinaire et extraordinaire, seront plus séparées qu'avec un seul cristal. La même chose aurait lieu, pourvu que les sections principales des deux rhomboèdres restassent dans le même plan ou dans des plans parallèles, quand même les deux faces en regard des cristaux ne conserveraient pas leur parallélisme; et il n'est pas nécessaire non plus que, dans la première position, les deux rhomboèdres se touchent.

Voilà donc déjà une première différence entre le rayon lumineux avant sa réfraction dans le spath d'Islande, et chaque rayon émergent ordinaire ou extraordinaire : tandis que le premier se bifurque en pénétrant dans le cristal, il semble que chacun des deux autres reste simple, en pénétrant dans le second cristal. Poursuivons notre étude.

Faisons maintenant tourner lentement le cristal supérieur, de façon que la section principale fasse avec celle du premier des angles de plus en plus grands. On va voir alors apparaître quatre images; chacune des deux premières sera dédoublée, mais sans conserver l'égalité d'intensité qui caractérisait celles-ci. De ces quatre images, disposées aux sommets d'un losange à côtés constants, mais à angles variables, deux proviennent de la double réfraction, dans le cristal supérieur, du rayon ordinaire émergent; les deux autres proviennent de la double réfraction du rayon extraordinaire. Mais, différence importante à signaler, en général chaque couple est caractérisé par une différence dans l'intensité lumineuse des images. La figure 194

représente leurs positions et leurs intensités relatives pour des angles, compris entre 0° et 180°, des sections principales des deux cristaux. Si les sections principales sont à angle droit, on ne voit plus que deux images; si elles font un angle de 180°, il en est de même, à moins que, les cristaux ayant la même épaisseur, les deux images ne se superposent; dans ce dernier cas, les déviations opérées par chaque cristal se faisant en sens opposés, on n'a plus qu'une image unique.

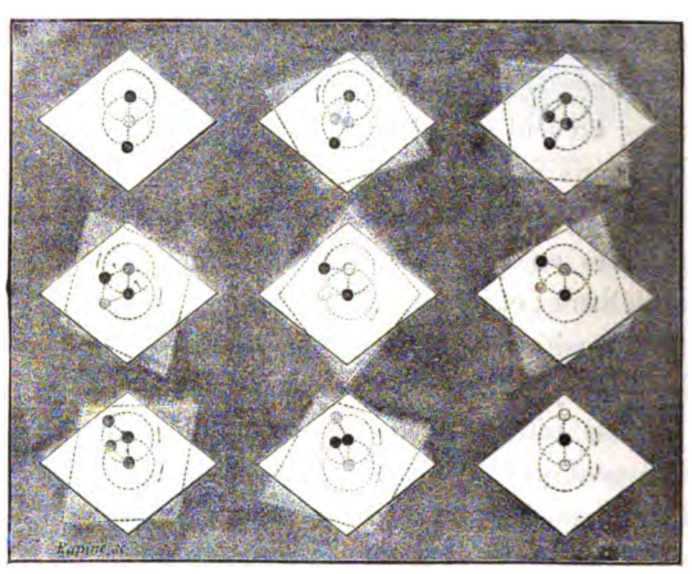


Fig. 194. — Expérience d'Huygens. Variations d'intensité des images provenant de deux faisceaux polarisés par double réfraction.

Il résulte déjà de cette première expérience que tout rayon de lumière qui a traversé un cristal doué de la double réfraction ne jouit plus, après son passage, des mêmes propriétés dans tous les sens; dans certaines directions, il n'est plus susceptible de subir une nouvelle bifurcation, et dans les autres, les deux faisceaux dans lesquels il se divise n'ont plus même intensité lumineuse. Pour caractériser ces propriétés nouvelles, on dit que la lumière qui a traversé un cristal biréfringent est de la *lumière polarisée*[1].

1. C'est Malus qui « a donné le nom de *polarisation* à cette singulière modification de la lumière, d'après une hypothèse que Newton avait imaginée pour expliquer le phénomène : ce

Mais il est important de préciser les phénomènes que nous venons de décrire. Pour cela, supposons qu'on fasse arriver sur un premier cristal de spath d'Islande, dont la section principale est verticale, un faisceau de lumière solaire SI (fig. 195). Ce faisceau se divise, dans le plan de la section, en deux faisceaux, l'un ordinaire IR, l'autre extraordinaire IR'. Interceptons l'un des deux par un écran, et laissons passer l'autre à travers un second spath d'Islande; en général le faisceau lumineux, en traversant le second cristal, subira la double réfraction : il se partagera en deux faisceaux, I'_1R_1 qui est le faisceau ordinaire, et $I'_1R'_1$, qui est le faisceau extraordinaire. Enfin, à l'aide d'une

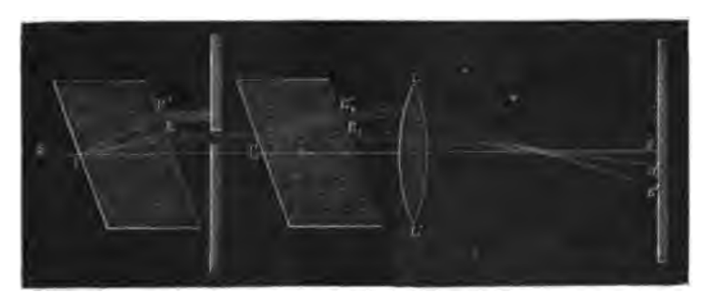


Fig. 195. — Polarisation du rayon ordinaire par double réfraction.

lentille, projetons les faisceaux émergents sur un écran. Voyons ce qui arrivera, si l'on fait tourner le second cristal de manière à faire faire à sa section principale tous les angles possibles avec celle du premier, de 0° à 360°. La figure 196 montre quelles sont les intensités relatives des deux images, si c'est le rayon ordinaire émergent du premier cristal qui a traversé le second; la figure 197 montre au contraire ce que sont ces intensités, quand on laisse passer dans le second spath d'Islande le rayon extraordinaire émergé du premier.

grand géomètre supposait que les molécules lumineuses ont deux sortes de pôles, ou plutôt de faces, jouissant de propriétés physiques différentes; que dans la lumière ordinaire les faces de même espèce des diverses molécules lumineuses sont tournées dans toutes sortes de sens, mais que par l'action du cristal les unes se trouvent dirigées parallèlement à sa section principale et les autres perpendiculairement, et que le genre de réfraction qu'éprouvent les molécules lumineuses tient au sens dans lequel leurs faces sont tournées relativement à la section principale. » (Fresnel.)

En résumé, un faisceau de lumière naturelle est entré dans le premier spath d'Islande où il subit la double réfraction, et chacun des faisceaux qui en sort a des propriétés particulières, que l'on caractérise en disant qu'il est *polarisé :* pour cette raison, le premier cristal reçoit le nom de *polariseur*. Le second cristal a servi à analyser les propriétés qu'a fait acquérir à chaque faisceau la polarisation : c'est le cristal *analyseur*.

Le rayon *ordinaire*, en passant dans l'analyseur, se divise en deux rayons dont l'intensité varie selon l'angle que fait la section principale du second cristal avec celle du premier, et



Fig. 196. — Dédoublement du rayon ordinaire. Intensités variables des images du faisceau polarisé.



Fig. 197. — Dédoublement du rayon extraordinaire. Intensités des images du faisceau polarisé.

qui donne deux images, l'une ordinaire, l'autre extraordinaire. Si cet angle est 0° ou 180°, l'image ordinaire existe seule avec l'intensité maximum, l'image extraordinaire a disparu ; à 90° ou 360°, l'image extraordinaire a le maximum d'éclat, l'autre a disparu. Pour des positions intermédiaires, où la seconde section principale forme avec la première des angles de 45°, les deux images ont même intensité. Enfin, dans les autres positions relatives des sections principales des cristaux, il y a inégalité d'intensité dans l'une ou l'autre des images. On dit alors que le rayon ordinaire est *polarisé* dans le plan de la section principale, et c'est à ce plan qu'on donne le nom de *plan de polarisation*. Maintenant, comme le second rayon, le rayon

extraordinaire éprouve les mêmes modifications en passant dans l'analyseur, avec cette différence essentielle qu'il y a toujours une différence de 90 degrés dans les positions relatives des sections principales, on dit qu'il est *polarisé* dans un plan perpendiculaire au premier plan de polarisation. Son plan de polarisation fait un angle droit avec la section principale du cristal polariseur. En un mot, les deux rayons, ordinaire et extraordinaire, provenant d'un rayon de lumière naturelle qui a subi une double réfraction, sont *polarisés à angle droit*.

La polarisation par double réfraction, telle que nous venons de l'étudier dans le spath d'Islande, se produit de la même manière avec tous les cristaux biréfringents. Mais il n'est pas toujours facile de l'observer, à cause de la faible séparation des faisceaux ordinaires et extraordinaires. Avec le spath lui-même, il faut des cristaux d'une certaine épaisseur, pour qu'on puisse intercepter facilement l'un d'eux avec un écran. Aussi a-t-on imaginé, pour obtenir cette séparation des faisceaux polarisés, des appareils plus commodes, parmi lesquels nous décrirons le *prisme de Nicol*.

Le prisme de Nicol consiste en un long cristal de spath d'Islande qui a été scié en deux, selon un plan perpendiculaire à la section principale. Les deux fragments, replacés dans leur position primitive, sont collés au moyen d'une couche de baume du Canada. L'indice de réfraction de cette substance est intermédiaire entre les deux indices de réfraction du spath d'Islande correspondant, l'un au rayon ordinaire, l'autre au rayon extraordinaire. Il résulte de là, comme on le démontre rigoureusement et comme l'expérience le confirme, que si un rayon de lumière pénètre dans le sens de la longueur du cristal et s'y partage en deux par la double réfraction, le rayon ordinaire éprouve la réflexion totale à la surface du baume de Canada, tandis que le rayon extraordinaire passe seul dans la seconde moitié du cristal et émerge par la face opposée.

Supposons qu'on emploie deux prismes de Nicol pour répé-

ter l'expérience d'Huygens. Il est clair qu'on n'obtiendra jamais que deux images, celles qui proviennent du rayon émergent, c'est-à-dire du rayon extraordinaire polarisé par le premier prisme. Si les sections principales des deux prismes sont parallèles, l'une des deux images, l'ordinaire, est nulle ; l'autre, l'extraordinaire, a son maximum d'éclat ; si les sections principales sont à angle droit, toutes les deux disparaissent, puisque l'image ordinaire, qui devrait avoir une intensité maximum, subit la réflexion totale, et que l'image extraordinaire a une intensité nulle. Le premier prisme, celui qui reçoit le rayon de lumière naturelle, est le *nicol polariseur*, l'autre est le *nicol analyseur*.



Fig. 198. — Échantillon de tourmaline de Sibérie.

Cette propriété du prisme de Nicol de ne laisser passer que le rayon extraordinaire appartient aussi à un cristal naturel, la tourmaline, qui, sous une certaine épaisseur, absorbe fortement le rayon ordinaire. C'est Biot qui a découvert, en 1815, cette propriété remarquable : elle va nous permettre de donner, d'après J. Herschel, un nouvel exemple de la polarisation de la lumière par double réfraction. « Quand, à l'aide d'une roue de lapidaire, on a clivé un prisme de tourmaline en lames parallèles à l'axe, et d'une épaisseur uniforme d'environ un vingtième de pouce ($1^{mm},27$), on donne à ces lames le poli convenable. Alors les objets lumineux paraissent au travers comme si on les regardait avec un verre coloré. Concevons une de ces lames interposée perpendiculairement entre l'œil et une chandelle : celle-ci sera vue avec une égale facilité dans toutes les positions de l'axe de la lame à l'égard de l'horizon. Si l'on fait tourner la lame dans son propre plan, on ne remarque aucun changement dans l'image de la chandelle. Donnant alors à cette pre-

mière lame une position fixe (en plaçant son axe verticalement par exemple), on interposera entre elle et l'œil une seconde lame qu'on fera tourner lentement dans son propre plan; ce qui produira un phénomène très curieux. La chandelle deviendra successivement visible et invisible à chaque quart de révolution de la lame, en passant par tous les degrés de clarté, depuis un certain maximum jusqu'à une obscurité totale ou presque totale; après quoi la clarté augmentera de la même manière qu'elle aura décru. Or, si l'on fait attention à la position de la seconde lame par rapport à la première, on trouvera que les maxima de clarté ont lieu lorsque les axes sont parallèles, c'est-à-dire lorsqu'ils sont disposés comme ils l'étaient ordinairement dans le cristal, ou lorsque leurs positions diffèrent de 180°. Les minima ont lieu, au contraire, lorsque les axes se croisent exactement à angles droits. Dans cette dernière situation, la lumière est totalement arrêtée si la tourmaline est d'une bonne couleur, et quoique chaque lame en particulier soit d'une transparence parfaite, leur combinaison est tout à fait opaque. » (Herschel, *la Lumière*.)

Ainsi, comme on voit, le faisceau de lumière naturelle qui a traversé une première lame de tourmaline se trouve polarisé, comme celui qui émerge d'un cristal de spath d'Islande. Il n'a plus sur tous ses côtés, sur toutes ses faces, si l'on peut s'exprimer ainsi, les mêmes propriétés, du moins au point de vue de son éclat. Nous allons voir maintenant que la double réfraction n'est pas le seul moyen de transformer la lumière naturelle en lumière polarisée.

§ 2. POLARISATION PAR RÉFLEXION.

En 1808, Malus, physicien français, qui s'est illustré par ses beaux travaux sur l'optique, regardant par hasard, à travers un cristal de spath d'Islande, l'image du soleil couchant réfléchie par les vitres du palais du Luxembourg, remarqua

avec surprise qu'en faisant tourner le prisme, les deux images changeaient d'intensité : la plus réfractée était alternativement plus ou moins brillante que l'autre, à chaque quart de révolution. En analysant minutieusement ce phénomène, il découvrit que la réflexion sous certains angles suffit pour donner au rayon lumineux les mêmes propriétés que possède un rayon qui a traversé un cristal biréfringent tel que le spath d'Islande. L'expérience de Huygens, dont Huygens et Newton avaient essayé en vain de donner la théorie, ne fut plus un phénomène isolé, et c'est en s'efforçant de la rattacher à une même explication déduite de la théorie de Newton, que Malus fut conduit à donner le nom de polarisation de la lumière à la modification subie par les rayons lumineux dans les expériences rapportées plus haut. Trois ans plus tard, en 1811, Malus, Biot et Brewster découvraient séparément la polarisation par réfraction simple, et Arago la polarisation chromatique; et depuis, une multitude de faits nouveaux, se rattachant à des modifications singulières des rayons lumineux, vinrent concourir, avec les phénomènes dont nous venons de parler, à former une des plus intéressantes branches de la science, aussi féconde pour la théorie que pour ses applications pratiques. Comme les bornes et la nature élémentaire de cet ouvrage ne nous permettent pas d'entrer dans de longs détails, nous nous contenterons de décrire quelques-uns des plus remarquables parmi ces phénomènes.

Quand un faisceau de lumière naturelle tombe obliquement sur un miroir non métallique, de verre noir, de marbre, d'obsidienne, il acquiert, par la réflexion à la surface, les mêmes propriétés que s'il eût été traversé par un cristal doué de la double réfraction : il est *polarisé*.

On pose sur une table, devant une fenêtre ouverte, une plaque de verre noir, puis on se place de manière à recevoir obliquement, sous une inclinaison d'environ 35°, la lumière des nuées réfléchie par la plaque. L'éclat du miroir paraît alors uniforme. Si, sans changer alors de position, on observe la surface brillante à travers une lame de tourmaline, taillée parallèlement à

son axe optique, et si l'on fait tourner cette lame dans son propre plan, on remarque, dans l'éclat de l'image des nuées formées sur la plaque de verre, les variations suivantes : si l'axe de la tourmaline est dans un plan vertical, l'image brillante disparaît ; la plaque de verre semble couverte d'une sorte de nuage obscur, et le centre de la tache est entièrement noir. Quand cet axe est, au contraire, horizontal, c'est-à-dire parallèle à la plaque de verre, la tache disparaît complètement ; enfin, dans les positions intermédiaires de l'axe de la tourmaline, l'éclat de l'image va graduellement en s'éclaircissant de la première situation à la seconde.

Si l'analyseur, au lieu d'être une lame de tourmaline, est un prisme de Nicol, les variations d'éclat de l'image se succèderont de la même manière : le minimum aura lieu quand la section principale du prisme sera verticale, et le maximum quand cette section sera à angle droit avec la première de ses positions.

De ces deux expériences on tire la conclusion qu'un faisceau lumineux, tombant sous une inclinaison de 35°25′ (ou, ce qui est la même chose, sous une incidence de 54°35′), sur une plaque de verre noir, est, après sa réflexion, polarisé dans le plan même de cette réflexion. Cet angle de 54°35′ est ce qu'on nomme l'angle de polarisation du verre : c'est celui pour lequel le rayon réfléchi peut être complètement éteint par le polariscope analyseur : c'est ce qu'on exprime en disant que le rayon est complètement polarisé. Quand l'angle d'incidence a une autre valeur, l'image du faisceau n'est pas complètement éteinte : le rayon réfléchi est partiellement polarisé.

L'angle de polarisation varie avec les substances réfléchissantes. Ainsi, il est de 52°45′ pour l'eau, de 56°3′ pour l'obsidienne, de 58°40′ pour la topaze, de 68°2′ pour le diamant. Brewster a imaginé une très curieuse expérience pour mettre en évidence la différence que nous signalons entre les angles de polarisation de deux substances, du verre et de l'eau par exemple. Il dispose une plaque de verre de façon qu'elle re-

[illegible]



Fig. [illegible]. — Polariscope de Malus perfectionné par Biot.

ce qu'alors la réflexion a lieu sur une couche d'eau, et que l'angle de polarisation de l'eau n'est pas le même que celui du verre.

Malus a imaginé un appareil à l'aide duquel toutes les propriétés de la lumière polarisée par réflexion peuvent être étudiées. Outre celles que nous venons de décrire, nous signalerons encore celles qui caractérisent cette lumière quand elle se réfléchit en tombant sur une seconde plaque réfléchissante.

La figure 199 représente l'appareil de Malus, modifié et perfectionné par Biot. I est la plaque polie destinée à polariser le rayon de lumière SI, par sa réflexion sur la surface de la plaque; on voit ensuite un tube noirci au dedans, muni de diaphragmes, et suivant l'axe duquel passe le rayon réfléchi et polarisé II'.... En sortant du tube, le rayon tombe sur une plaque I' en verre noir, s'y réfléchit de nouveau, et va, soit tomber dans l'œil, soit former une image sur un écran E. Les cadres qui maintiennent les deux plaques réfléchissantes peuvent tourner autour d'un axe perpendiculaire à celui du tube, de manière que leurs plans puissent faire avec ce dernier tous les angles possibles; de plus, on peut faire tourner chaque plaque dans une de ses positions, autour de l'axe même du tube; de sorte qu'en définitive, pour une incidence donnée du rayon lumineux sur la première plaque, on peut faire varier à volonté et l'angle d'incidence du rayon polarisé sur l'autre plaque, et l'angle du second plan de réflexion avec le premier.

On trouve, à l'aide de cet appareil, que le maximum d'éclat de l'image a lieu quand les deux plans de réflexion coïncident, et le minimum quand ces deux plans sont à angle droit. De plus, le rayon est complètement éteint quand l'angle d'incidence sur chacun des deux miroirs est de 35°25', pourvu toutefois que le faisceau n'ait pas une intensité trop vive, comme dans le cas où c'est de la lumière solaire.

Brewster a découvert une loi fort simple, qui existe entre l'angle de polarisation et l'indice de réfraction de la substance polarisant la lumière par réflexion, de sorte que, l'un de ces éléments étant connu, on peut en déduire l'autre. Cette loi est l'expression de la relation géométrique suivante : *Le rayon réfléchi* IR (fig. 200), *polarisé sous l'angle de polarisation, et le rayon réfracté* Ir *forment un angle droit.*

La réfraction simple polarise aussi la lumière. C'est ce que Malus, Biot et Brewster ont découvert, chacun de leur côté, en

[illegible] à l'angle de [illegible] par un [illegible] le plan [illegible] que le [illegible] d'émergence [illegible] laissant [illegible] intensité, mais [illegible] complètement polarisée [illegible] le plan d'incidence sur [illegible] au plan d'incidence sur le [illegible]



Fig. 200. — [illegible]

on voit que le plan de polarisation est, dans ce cas, perpendiculaire au plan de réfraction.

On obtient un faisceau complètement polarisé par réfraction sur le verre en lui faisant traverser successivement plusieurs lames de verre parallèles sous l'angle de [illegible], qui est, nous l'avons vu, l'angle de polarisation du verre. Ces lames minces, très polies, doivent être appliquées les unes sur les autres, mais sans adhérence complète, de façon qu'une mince couche d'air reste interposée entre deux plaques successives : l'appareil ainsi disposé se nomme pile de glaces; on s'en sert comme polariseur en le mettant dans l'appareil de Biot, à la place de la glace I.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur cette classe si curieuse de phénomènes, dont la description détaillée nous entraînerait trop loin, et qui d'ailleurs, pour être bien compris, exigeraient des développements théoriques difficiles. Nous avons voulu seulement initier le lecteur aux faits fondamentaux, à ceux dont la découverte a été le point de départ de cette branche si importante de l'optique moderne.

§ 3. COULEURS DE LA LUMIÈRE POLARISÉE.

« En examinant, par un temps serein, une lame assez mince de mica, à l'aide d'un prisme de spath d'Islande, je vis que les deux images qui se projetaient sur l'atmosphère n'étaient pas teintes des mêmes couleurs : l'une d'elles était jaune-verdâtre, la seconde rouge-pourpre, tandis que la partie où les deux images se confondaient était de la couleur du mica vu à l'œil nu. Je reconnus en même temps qu'un léger changement dans l'inclinaison de la lame par rapport aux rayons qui la traversent, fait varier la couleur des deux images, et que si, en laissant cette inclinaison constante et le prisme dans la même position, on se contente de faire tourner la lame de mica dans son propre plan, on trouve quatre positions à angle droit où les deux images prismatiques sont du même éclat et parfaitement blanches. En laissant la lame immobile, et faisant tourner le prisme, on voyait de même chaque image acquérir successivement diverses couleurs et passer par le blanc après chaque quart de révolution. Au reste, pour toutes ces positions du prisme et de la lame, quelle que fût la couleur d'un des faisceaux, le second présentait toujours la teinte complémentaire, en sorte que, dans les points où les deux images n'étaient point séparées par la double réfraction du cristal, le mélange de ces deux couleurs formait du blanc. »

C'est en ces termes qu'Arago décrit, dans un Mémoire lu à l'Académie des sciences le 11 août 1811, l'expérience qui fut pour lui le point de départ d'une série de découvertes sur les phénomènes de coloration de la lumière polarisée. Il reconnut immédiatement que la lumière transmise par la lame de mica était de la lumière polarisée par réflexion sur les couches atmosphériques ; par un temps couvert, quand la lumière qui vient des nuées a les caractères de la lumière naturelle, les deux images vues à travers la lame de mica n'offrent aucune trace de

coloration. Ainsi, pour que le phénomène se produise, il faut que la lumière qui traverse la lame cristallisée ait été préalablement polarisée. Cette condition fut mise hors de doute par Arago au moyen de plusieurs expériences dans lesquelles il recevait sur la lame de mica des rayons réfléchis par un miroir de verre noir : il remarqua alors que les couleurs des deux images observées avec le spath d'Islande étaient d'autant plus vives que



Fig. 201. — François Arago.

la lumière avait été réfléchie sous un angle plus voisin de l'angle de polarisation du verre.

Toutes les substances biréfringentes, taillées en lames minces parallèlement à l'axe, jouissent de la même propriété de colorer la lumière polarisée qui les traverse; ainsi, on peut employer des lames de gypse (sulfate de chaux), de cristal de roche, de spath d'Islande. Mais les épaisseurs de ces lames qui donnent les couleurs varient d'une substance à l'autre; et, pour chacune

d'elles, on n'obtient d'images colorées que si cette épaisseur est comprise entre certaines limites. Ainsi une lame de sulfate de chaux doit avoir plus de $0^{mm},425$ et moins de $1^{mm},27$ d'épaisseur; une lame de mica, moins de $0^{mm},085$; une lame de cristal de roche, moins de $0^{mm},45$. Il est difficile d'obtenir des couleurs avec le spath d'Islande, parce que l'épaisseur de la lame ne doit pas dépasser la quarantième partie d'un millimètre.

L'inclinaison de la lame sur la direction des rayons polarisés influe sur les couleurs, qui varient rapidement quand cette inclinaison varie. Enfin, l'épaisseur, pour une même inclinaison de la lame et une même position du prisme, influe aussi sur les couleurs des images, et M. Biot a trouvé que les lois de variation de ces nuances sont précisément celles que Newton a trouvées pour les anneaux colorés des lames minces, obtenus par la superposition de deux lentilles; mais les épaisseurs des lames biréfringentes, qui correspondent aux couleurs des divers ordres de Newton, sont beaucoup plus considérables que celles de la lame d'air comprise entre les lentilles.

On se sert de cette propriété du changement de couleur des images avec l'épaisseur pour produire des effets variés et curieux. Si, après avoir collé sur du verre une lame de gypse, on y creuse une cavité de forme sphérique à grand rayon, et qu'on l'observe dans l'appareil de Biot, de sorte que la lumière qui arrive à l'œil après avoir traversé la lame de gypse et l'analyseur, ait été préalablement polarisée, on aperçoit une série d'anneaux colorés concentriques, comme ceux qu'on voit autour du point de contact de deux lentilles. En gravant en creux sur la lame divers objets, des fleurs, des insectes, des papillons, on peut calculer les profondeurs de la gravure, aux divers points, de manière à reproduire les couleurs vives et variées des objets naturels. « Autrefois on faisait mieux, disait récemment M. Bertin dans une intéressante conférence sur la polarisation : on profitait de la circonstance pour rendre hommage à l'auteur de ces belles expériences. Au milieu d'une couronne de feuillage apparaissait le nom d'Arago avec la date de sa découverte. Du

vivant du grand homme, c'était peut-être une flatterie; mais maintenant qu'il n'est plus, la suppression de cette expérience




Fig. 202. — Couleurs de la lumière polarisée dans les lames minces.

(dans les cours de physique) est un acte d'ingratitude : nous oublions nos morts pour courir après les papillons. »

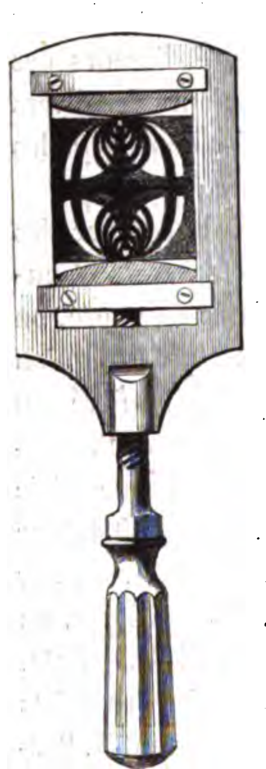


Fig. 203. — Couleurs de la lumière dans le verre comprimé.

Il serait juste de joindre au nom d'Arago celui de Brewster, qui a fait de son côté, et à la même époque, à peu près les mêmes découvertes, et à qui l'on doit notamment celle des anneaux colorés dans les cristaux à un et à deux axes.

Avant d'entrer dans quelques détails sur ces phénomènes remarquables, disons que le verre qui, à l'état ordinaire, n'est pas susceptible de donner les couleurs observées dans les lames cristallisées, acquiert cette propriété par la trempe, par la flexion et la compression, et par l'action de la chaleur. Les figures 203 et 204 montrent quelques-unes des apparences offertes dans ces diverses circonstances par des plaques de verre d'une certaine épaisseur, et de forme rectangulaire ou carrée. C'est à Seebeck (1815) qu'on doit la découverte de ces phénomènes, de même nature que ceux dont nous venons de donner

la description. Voici encore une expérience curieuse de Biot, rapportée par M. Daguin dans son *Traité de Physique :* « Ce savant ayant excité des vibrations longitudinales dans une bande de verre de 2 mètres de longueur placée entre le polariscope et les polariseurs de son appareil, disposé pour donner l'obscurité, vit, à chaque friction, jaillir une vive lumière, dont l'éclat et la couleur dépendaient du mode de frottement et de son énergie. »

Les couleurs de la lumière polarisée produites par le passage d'un faisceau de cette lumière à travers une lame mince cris-

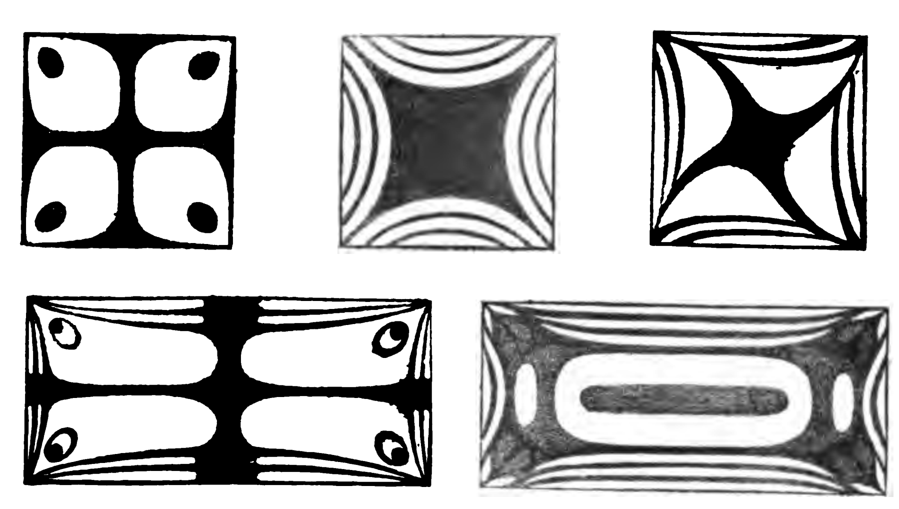


Fig. 204. — Couleurs de la lumière polarisée dans le verre trempé.

tallisée dépendent, ainsi que nous l'avons vu plus haut, de l'épaisseur de la lame : elles varient si cette épaisseur varie elle-même. Mais pour une même épaisseur la teinte est uniforme, parce que tous les rayons qui composent le faisceau sont parallèles, et dès lors parcourent le même espace à l'intérieur de la lame.

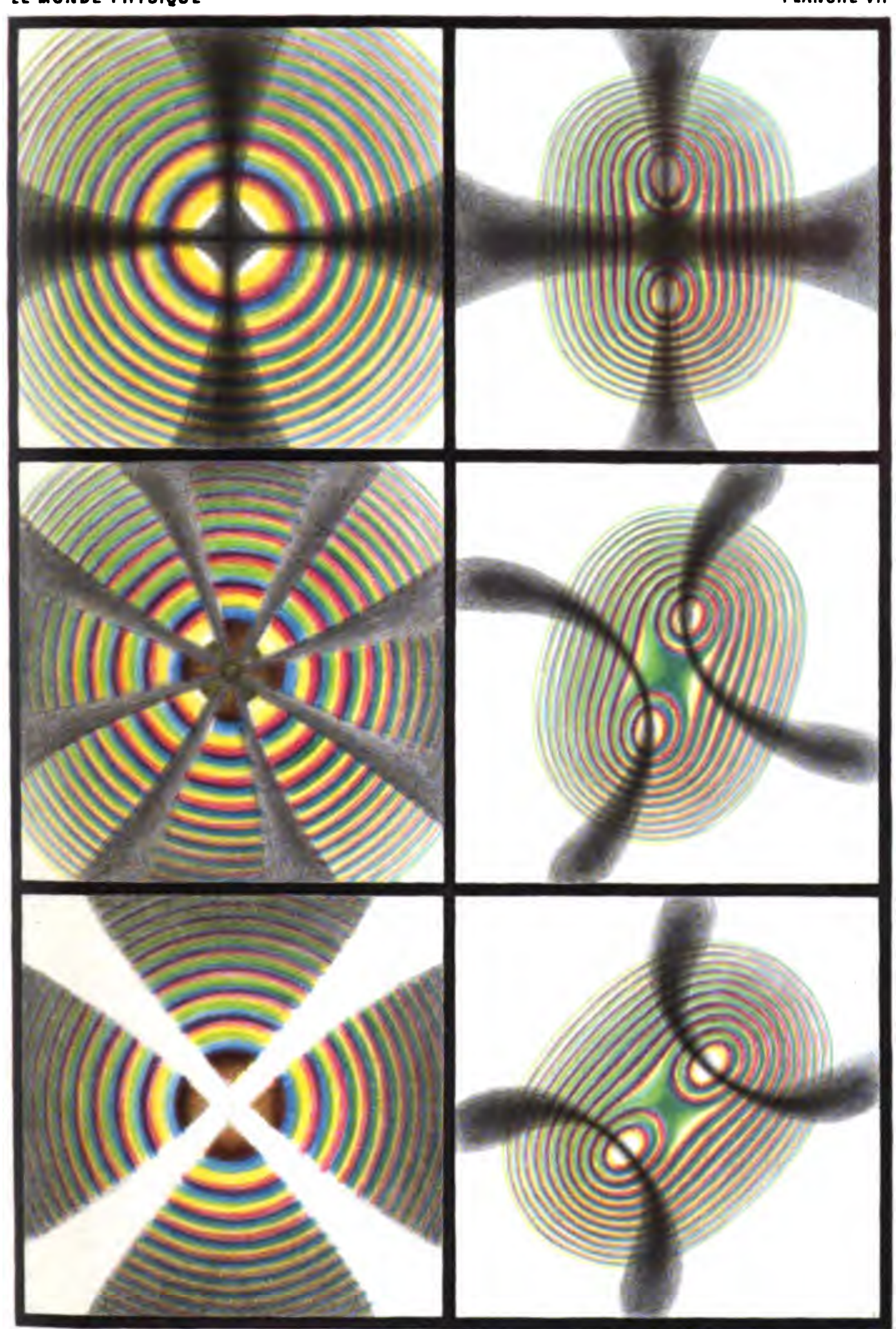
Si, au lieu d'un faisceau, c'est un pinceau conique de lumière polarisée qu'on reçoit sur la lame, de façon que l'axe du cône soit perpendiculaire à la surface de celle-ci, il est clair que les rayons parcourront, à l'intérieur du cristal, des chemins d'autant plus longs qu'ils seront plus éloignés de l'axe, et

la teinte que prendra la lame observée à l'aide d'un analyseur ne sera plus uniforme. On voit alors des systèmes d'anneaux colorés dont la forme et les teintes varient selon qu'il s'agit d'un cristal à un ou à deux axes optiques, et selon la position du polariscope par rapport au plan de polarisation. Voici comment on procède pour obtenir ces beaux phénomènes, en partie reproduits dans la planche VII :

On prend une pince à tourmaline (fig. 205). Cet instrument consiste en deux anneaux métalliques, qu'un ressort en forme de pince presse l'un contre l'autre, et dans chacun desquels se trouve enchâssée une plaque de tourmaline ; chaque plaque peut tourner dans son anneau, de sorte qu'on peut donner à volonté toutes les positions angulaires possibles aux axes des deux cristaux biréfringents. On interpose entre les deux anneaux la plaque mince cristallisée, de spath d'Islande par exemple, fixée à un disque de liège que la pression des anneaux maintient entre les tourmalines. On n'a qu'à regarder alors la lumière du ciel à travers le système des trois lames pour apercevoir les anneaux colorés. La lame de tourmaline, tournée vers le ciel, polarise la lumière des nuées, qui, après avoir traversé cette première plaque, converge vers l'œil en passant par la lame de spath et la seconde tourmaline.


Fig. 205. — Pince à tourmaline.

Supposons qu'on ait disposé d'abord les deux tourmalines de manière que leurs axes soient perpendiculaires : le plan primitif de polarisation est alors parallèle à la section principale de la tourmaline qui sert de polariscope. On voit alors une série d'anneaux concentriques irisés, traversés par une croix noire (planche VII, fig. 1). Si l'on fait alors tourner le polariscope de 90°, les axes des tourmalines seront parallèles, et la section principale du polariscope sera à angle droit avec le plan de polarisation. La croix noire se trouve alors remplacée par



ANNEAUX COLORÉS
dans les cristaux biréfringents
À UN AXE ET À DEUX AXES

une croix blanche, et les anneaux irisés présentent, aux mêmes distances du centre, des couleurs complémentaires de celles qu'ils affectaient dans la première expérience (planche VII, fig. 3). Dans les positions intermédiaires des axes des tourmalines, on passe graduellement de la première apparence à la seconde : si les axes sont inclinés de 45°, on obtient la figure 2 de la planche VII.

Tels sont les phénomènes, quand on se sert de la lumière blanche. Si l'on s'était servi de lumière homogène, de lumière jaune par exemple, on eût obtenu des anneaux alternativement brillants et noirs, traversés par des croix semblables à celles qu'on vient de voir dans les expériences précédentes, les anneaux brillants étant de couleur jaune. Les anneaux de même ordre seraient, si l'on employait les diverses couleurs du spectre, d'autant plus grands que ces couleurs sont plus réfrangibles. Voilà pourquoi les anneaux sont irisés avec la lumière blanche, et pourquoi le violet occupe, dans ce cas, le bord extérieur de chaque anneau dans la première position du polariscope.

C'est en 1813 que Brewster découvrit les anneaux colorés produits par la lumière polarisée, quand elle vient à traverser, en convergeant, des lames minces de cristaux biréfringents : il les vit d'abord dans le rubis, l'émeraude, la topaze, la glace, le nitre, et plus tard le docteur Wollaston les observa dans le spath d'Islande. En étudiant ces phénomènes dans les différentes substances cristallisées, Brewster arriva à distinguer les cristaux biréfringents en deux classes, celle des cristaux à un axe, et celle des cristaux à deux axes. Voici comment : tandis que dans le rubis, l'émeraude, le spath par exemple, il n'aperçut qu'un simple système d'anneaux colorés, dans le nitre, la topaze, taillés suivant une certaine direction et observés à travers la pince à tourmaline, etc., il observa un double système d'anneaux, alternativement noirs et brillants si la lumière polarisée qui les traverse est homogène, et irisés si cette lumière est blanche. C'est ce phénomène qui fit découvrir à Brewster les cristaux biréfringents à deux axes.

Pour observer les anneaux dont il s'agit, on taille une lame, de nitre par exemple, perpendiculairement à la ligne moyenne des deux axes, et on l'interpose entre les anneaux de la pince à tourmaline. On aperçoit alors l'une des figures 4, 5 et 6 de la planche VII. La figure 6 correspond au cas où le plan des axes de la lame de nitre est parallèle au plan primitif de polarisation ; la figure 4 à celui où ces plans font un angle de 45°; enfin la figure 5 représente les anneaux donnés par la position intermédiaire. Au delà de 45° jusqu'à 90°, on retrouve les mêmes apparences, et il en est de même dans chaque angle droit, si

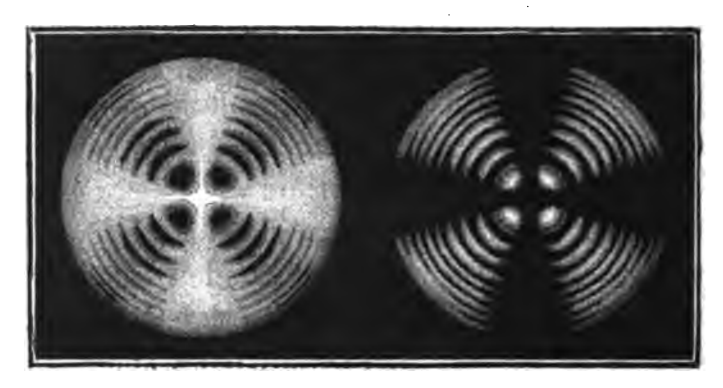


Fig. 206. — Anneaux colorés du spath.

l'on continue à faire tourner sur elle-même la plaque de nitre. Avec la lumière homogène, on obtient des anneaux alternativement noirs et brillants, ces derniers étant de la couleur de la source.

Si, en laissant la lame fixe entre les deux tourmalines, on fait tourner le polariscope ou analyseur, c'est-à-dire la tourmaline voisine de l'œil, les anneaux, sans changer de position, changent peu à peu de couleur, et quand la rotation est de 90° ou de 270°, ces couleurs sont devenues les complémentaires de celles que donnaient les anneaux dans les mêmes positions de la lame : les croix noires ont été remplacées par des croix blanches.

§ 4. DIRECTION TRANSVERSALE DES VIBRATIONS LUMINEUSES.

Nous nous arrèterons là dans la description des phénomènes que produit la lumière polarisée, phénomènes des plus intéressants, et dont l'énumération seule exigerait de longues pages. Le but que nous nous sommes proposé en abordant cette partie de l'optique est beaucoup plus, nous l'avouons, d'exciter la curiosité du lecteur, et de l'engager ainsi à entreprendre une étude plus complète, que de lui donner une idée nette des causes de ces phénomènes, c'est-à-dire de montrer quelle explication reçoivent ceux-ci dans la théorie des ondulations. Nous ne pouvons nous empêcher cependant de résumer en quelques lignes les importants progrès que la théorie a faits, sous l'impulsion des découvertes qui se sont succédé si rapidement au commencement de notre siècle.

Nous avons vu dans un chapitre précédent que les phénomènes lumineux sont dus au mouvement vibratoire du milieu élastique qu'on nomme éther. Les phénomènes d'interférence, inexplicables dans le système de l'émission, trouvent au contraire dans l'hypothèse des ondulations une explication des plus simples et des plus satisfaisantes ; mais elles n'apprennent rien sur le sens dans lequel ont lieu les vibrations de l'éther. On pouvait supposer avec une égale vraisemblance que les oscillations d'une molécule s'effectuent, soit dans le sens de la propagation de la lumière, soit dans une direction parallèle à la surface des ondes, ou perpendiculaire au rayon lumineux, soit enfin dans une direction quelconque oblique à ce rayon.

Mais en adoptant la première hypothèse, celle qui assimile pour ainsi dire les ondes lumineuses aux ondes sonores, il était impossible de rendre compte de la transformation que subit un rayon lumineux quand il a traversé un milieu biréfringent, ou qu'il s'est réfléchi sous un certain angle à la surface d'un corps poli. Pourquoi, si les vibrations étaient longitudinales, le rayon polarisé aurait-il, dans certains plans, des propriétés

particulières? Pourquoi ces propriétés appartiendraient-elles exclusivement à certains côtés du rayon? Ces objections portaient une grave atteinte à la théorie des ondulations, quand Fresnel eut l'idée de substituer à l'hypothèse des vibrations longitudinales celle des vibrations transversales perpendicu-



Fig. 207. — Augustin Fresnel.

laires à la direction de la propagation lumineuse. Un rayon de *lumière naturelle* est alors celui dans lequel les mouvements vibratoires s'effectuent successivement dans tous les sens à la surface de l'onde, ses propriétés doivent donc être les mêmes de tous les côtés. Mais si ce rayon vient à traverser un polariseur, en sortant du milieu biréfringent, les vibrations dont il se

compose, au lieu de s'effectuer dans tous les sens, sont devenues parallèles, tout en s'effectuant toujours dans des plans perpendiculaires au rayon. Le polariseur a, pour ainsi dire, tamisé les vibrations du rayon de lumière naturelle : il a arrêté ou détruit les unes, pour ne laisser passer que les vibrations qui se trouvent dans le plan de la section principale. Pour parler plus juste : toute vibration parallèle à la section principale passe sans altération dans le cristal ; toute vibration perpendiculaire est anéantie ; enfin toute vibration oblique aux deux premières se trouve décomposée en deux autres, l'une parallèle à la section principale du polariseur et qui passe, l'autre perpendiculaire, qui est arrêtée. De là les propriétés, que nous avons décrites, de la *lumière polarisée.*

Les conséquences de la théorie des ondes ainsi modifiée sont très nombreuses : jusqu'ici elles ont toutes été vérifiées par l'expérience ; ou, si l'on veut, les phénomènes trouvés par l'observation s'expliquent comme ceux déduits de la théorie, avec une rigueur qui est la plus éclatante consécration des principes qui constituent le système des ondes.

Ajoutons maintenant quelques lignes sur les applications qu'on a faites de la polarisation de la lumière à l'étude des sciences physiques et naturelles.

Arago s'est servi de la polarisation par double réfraction pour construire un appareil photométrique basé sur l'intensité relative des deux images, intensité dont Malus a donné la loi. Le même savant a indiqué un moyen de distinguer en mer les écueils cachés sous l'eau, et masqués par l'éclat de la lumière réfléchie à la surface. En regardant à travers un prisme de Nicol dont on a soin de placer verticalement la section principale, les rayons réfléchis sont éteints, et les rayons réfractés, seuls transmis à l'œil, révèlent la présence des rochers submergés.

La polarisation par réflexion permet de reconnaître si la lumière qui nous vient d'un corps a été réfléchie à sa surface. C'est ainsi qu'on a vérifié la nature de la lumière des astres,

qui, comme la Lune et les planètes, nous renvoient tout simplement les rayons du Soleil, et qu'on a reconnu que la lumière des noyaux cométaires est en partie empruntée au Soleil, puisque divers observateurs y ont constaté des traces de polarisation dans un plan passant par le Soleil et le noyau.

La lumière de l'arc-en-ciel est polarisée dans un plan normal à l'arc et passant par l'œil de l'observateur. Nous verrons, en effet, que l'arc est formé de lumière réfléchie par les gouttelettes sphériques de la pluie. Arago s'est servi de la polarisation par réflexion pour vérifier la nature de certaines pierres précieuses : ayant fait tailler une petite facette à la surface de l'une d'elles, il détermina l'angle de polarisation et reconnut que c'était exactement celui du diamant. La polarisation chromatique est d'un grand secours pour l'étude des cristaux : elle permet de reconnaître si un cristal a un ou deux axes de symétrie, quelle est la position de ces axes dans le cristal, etc.

Enfin, le quartz et un grand nombre de liquides, l'eau sucrée, les solutions d'acide tartrique, l'albumine, jouissent d'une propriété que les physiciens ont caractérisée par le nom de *pouvoir rotatoire :* une plaque de quartz, taillée perpendiculairement à l'axe, dévie d'un certain angle le plan de polarisation des rayons qui la traversent ; et cette déviation est différente pour les rayons des couleurs simples. Si la lumière polarisée qui a traversé le quartz est de la lumière blanche, les couleurs qui la composent seront éteintes en proportions différentes. De là une certaine teinte provenant du mélange des rayons qui ne sont pas éteints. C'est le phénomène de la *polarisation rotatoire*, découverte par Arago en 1811, et dont Biot a étudié expérimentalement les lois.

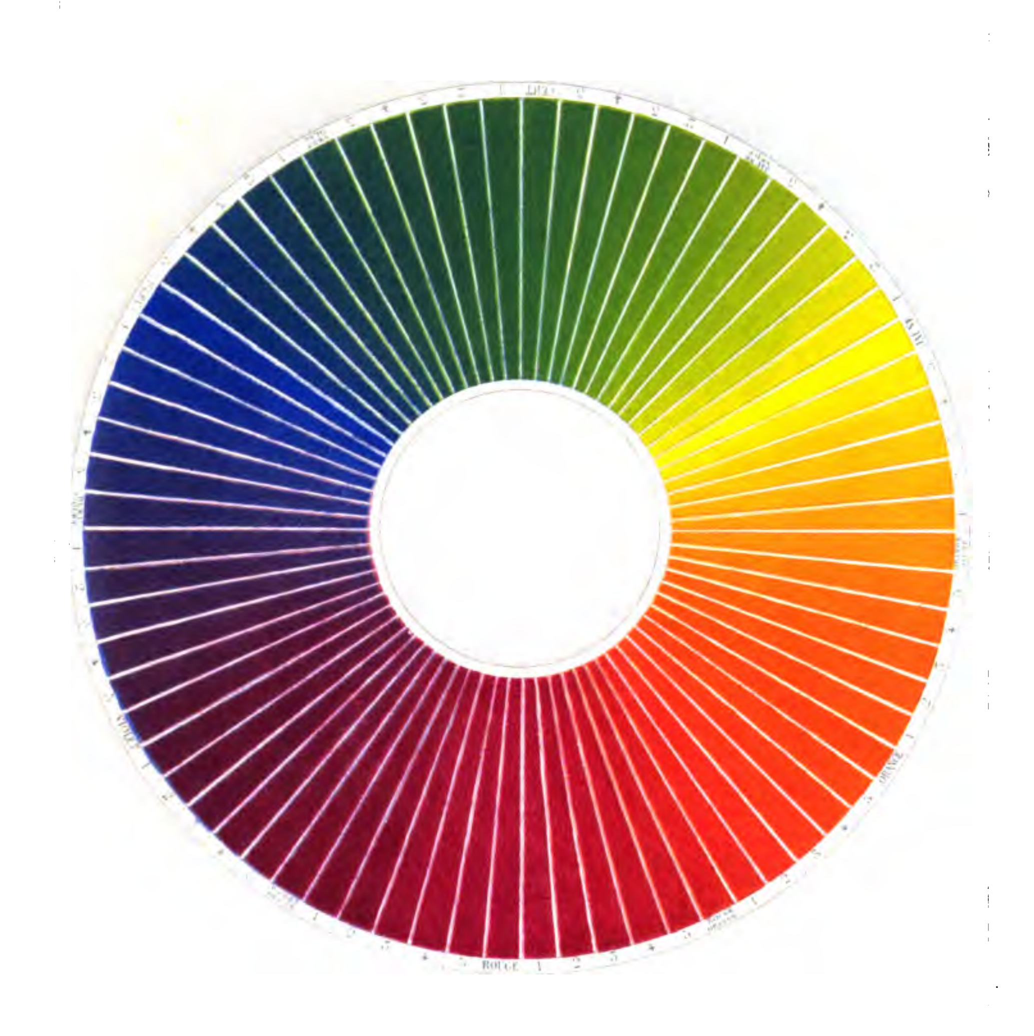
Or ces lois ont fourni à l'industrie une précieuse méthode, la *saccharimétrie*, à l'aide de laquelle on peut reconnaître la quantité de sucre pur que contient une dissolution sucrée. On voit donc que des phénomènes qui semblaient d'abord n'intéresser que la théorie, peuvent conduire à des applications pratiques d'une grande importance.

CHAPITRE XV

LES COULEURS DES CORPS

§ 1. COULEURS DES SOLIDES ET DES LIQUIDES INCANDESCENTS.

L'analyse spectrale des sources lumineuses nous a montré, dans la composition de leur lumière, autant de couleurs ou de nuances de couleurs simples qu'elles renferment de radiations. Les ondes lumineuses produisent ainsi, sur notre rétine, des impressions qui, dans notre cerveau se traduisent sous la sensation de couleur, tout comme les vibrations sonores, plus ou moins rapides, déterminent en nous la sensation des sons successifs, des sons graves pour les ondes dont la propagation est la plus lente, des sons aigus pour celles qui se propagent avec une rapidité plus grande. Du rouge le plus sombre du spectre solaire à l'extrême violet, telle est la série des vibrations lumineuses perceptibles pour notre œil : en deçà ou au delà, nous avons constaté qu'il existe des vibrations plus lentes et aussi des vibrations plus rapides ; mais ni les unes ni les autres ne causent en nous de sensation de lumière ou de couleur. C'est ainsi que notre oreille n'entend pas non plus les vibrations susceptibles d'engendrer le son, dès que leur rapidité s'abaisse au-dessous d'une certaine limite ou dépasse une autre limite supérieure. Mais ces deux échelles, toutes deux limitées, des sons et des couleurs ont encore cela de commun qu'elles sont continues, et qu'on passe d'un extrême à l'autre par des gradations insensibles.



CLASSIFICATION DES COULEURS

d'après le Système de M. Chevreul

CERCLE CHROMATIQUE DES COULEURS FRANCHES

les lumières blanches, c'est qu'elles sont produites par le concours d'ondes de tous les degrés possibles de réfrangibilité entre les limites des longueurs d'onde qui appartiennent à la partie lumineuse du spectre : tout au moins n'offrent-elles que des lacunes excessivement resserrées.

La couleur d'un solide incandescent dépend de la température : c'est ce que nous avons déjà constaté, quand nous avons parlé des nuances que prend le platine, depuis le rouge sombre correspondant à une température de 600° environ, jusqu'au blanc éblouissant, vers 1500°. Mais ce qu'il y a de particulier dans cet accroissement de radiations, c'est qu'il se fait d'une manière continue, sans lacune, par une extension successive de la plus faible réfrangibilité à la plus élevée. Il n'en est pas de même, en général, pour la lumière des vapeurs ou des gaz incandescents. Entrons à cet égard dans quelques détails.

§ 2. COULEURS DES FLAMMES.

Un morceau de métal, de platine par exemple, chauffé jusqu'à devenir lumineux, n'émet d'abord que des rayons très peu réfrangibles, appartenant à la partie rouge du spectre, correspondant dès lors aux vibrations lumineuses les plus lentes. Peu à peu, si la température s'élève, de nouvelles radiations, des vibrations plus rapides s'ajoutent aux premières, le spectre de la lumière émise s'étend, et quand il arrive à embrasser toutes les radiations possibles entre les limites visibles du spectre solaire, la lumière est entièrement blanche : l'incandescence atteint alors le point qu'on nomme le *blanc éblouissant*. C'est là ce qui se passe pour tous les solides et les liquides dont on élève la température à celle de l'incandescence. La lumière de ces corps est caractérisée par la continuité du spectre.

Il n'en est pas de même pour les gaz incandescents, ou pour les flammes lumineuses. Le spectre de leur lumière est discontinu. Les métaux qui, à l'état solide ou liquide, émettent des

rayons de toutes les longueurs d'onde, réduits en vapeur ne donnent plus que des spectres discontinus, formés d'un nombre plus ou moins grand de raies brillantes correspondant dès lors à des régions du spectre déterminées, dont chacune a une couleur propre. La flamme n'est donc plus blanche; elle a une couleur particulière qui résulte de l'association ou du mélange des parties lumineuses et colorées du spectre. C'est là un point que l'analyse spectrale a mis en pleine évidence.

Aussi la plupart des flammes lumineuses sont-elles colorées, et l'expérience prouve que cette coloration dépend de la nature des substances qui s'y trouvent en suspension et que la haute température volatilise. Bien avant que l'analyse eût rendu compte de ces effets, on savait donner aux flammes certaines couleurs. Dans les feux d'artifice, on obtenait des flammes rouges en mêlant du nitrate de strontiane aux substances explosives; le sulfure d'antimoine donnait des feux blancs et la limaille de zinc des feux bleus. Ce sont les effets lumineux connus dans le public sous le nom de *feux de bengale*.

La lumière des chandelles et des bougies, celle du gaz d'éclairage, des lampes à huile n'est pas blanche; elle est plus ou moins mélangée de rayons rouges et surtout jaunes. Le jaune provient des parcelles de sodium qu'elles renferment presque toujours. C'est la couleur caractéristique de la flamme sodique, le spectre du sodium étant, comme on l'a vu, aux températures ordinaires de l'incandescence, réduit à une raie brillante double, située dans le jaune. On obtient une lampe sensiblement *monochromatique* en mélangeant à l'alcool une dissolution aqueuse de sel marin (chlorure de sodium).

En introduisant dans la flamme d'un brûleur de Bunsen ou d'une simple lampe à alcool des sels de diverses natures, on obtient des colorations variées. D'après Herschel, voici quelques-uns des résultats :

Les sels de soude donnent à la flamme une couleur *jaune* homogène; les sels de potasse la rendent d'un *violet pâle;* les sels de chaux, *rouge-brique;* ceux de strontiane, *cramoisi bril-*

lant; de lithine, ***rouge;*** de baryte, ***vert-pomme*** pâle; de cuivre, *vert-bleuâtre;* de cobalt, ***bleue,*** et enfin les sulfates de fer, d'antimoine, d'arsenic donnent une lumière sensiblement *blanche.*

Il est aisé de se rendre compte de la coloration variée des flammes, si l'on se reporte aux raies brillantes des spectres de leurs éléments. On a vu que le spectre du lithium est composé de deux raies, l'une rouge, l'autre orangée; celui du strontium de plusieurs raies rouges, dont deux raies orangées et une raie bleue; que le spectre du potassium donne une raie rouge et une raie violette, et celui du baryum, plusieurs raies vertes et jaunes. D'autres spectres sont plus compliqués, et c'est la résultante des diverses raies brillantes dont ils sont formés, qui détermine la coloration composée de la flamme où leur vapeur devient incandescente : le fer, qui donne des radiations très nombreuses dans toute l'étendue du spectre lumineux, produit une coloration blanche, comme si, pour ainsi dire, sa radiation était continue.

§ 3. COULEURS DES CORPS OPAQUES. — THÉORIE DE NEWTON.

Ce que nous nommons ***couleur naturelle*** d'un corps, c'est la couleur dont il nous apparaît, quand il est éclairé par une lumière blanche très pure, celle des rayons solaires par exemple.

Le corps est-il apte à réfléchir dans une égale proportion toutes les couleurs de la lumière blanche, il est blanc lui-même, et d'un blanc d'autant plus éclatant que cette proportion est plus grande. A mesure, au contraire, que cette proportion diminue, la couleur blanche diminue d'intensité, devient grisâtre, de plus en plus foncée, et enfin atteint le noir quand l'absorption de tous les rayons colorés du spectre est aussi complète que possible. Les corps ***noirs*** sont donc ceux dont la constitution moléculaire est telle, que tous les rayons de la lumière blanche sont absorbés par leur surface, tandis que les corps ***blancs*** sont ceux qui les réfléchissent tous.

Si la surface du corps a la propriété d'absorber tous les rayons colorés du spectre, un excepté, le rouge je suppose, le corps nous semble rouge, parce qu'il ne réfléchit vers notre œil que les rayons rouges du spectre. Si cette surface n'absorbe qu'une portion plus restreinte des rayons colorés, la couleur du corps sera celle qui provient du mélange des rayons non absorbés, et c'est là ce qui explique le nombre considérable des couleurs et des nuances des corps, nuances et couleurs beaucoup plus variées que celles dont le spectre lui-même est composé. Ainsi les corps *colorés* sont ceux qui, réfléchissant certains rayons, absorbent les autres. Si cette explication est vraie, elle est susceptible de diverses vérifications expérimentales.

Prenons un corps blanc, et faisons en sorte qu'il ne reçoive que les rayons jaunes du spectre : cela est aisé, en plaçant le corps dans la chambre obscure, et en ne laissant arriver que les rayons jaunes du spectre obtenu par un prisme. Le corps paraîtra jaune ; il serait rouge, vert, bleu, etc., s'il n'était éclairé que par les rayons rouges, ou verts, ou bleus. Au contraire, un corps noir restera noir, quelle que soit la couleur dont il est éclairé. Enfin, un corps rouge paraîtra d'un rouge intense si on l'éclaire avec la lumière provenant des rayons rouges du spectre, tandis qu'il paraît noir si on l'expose aux rayons des autres couleurs.

L'expérience confirme tous ces résultats. On observe cependant que les corps colorés prennent la teinte des rayons qui les éclairent, alors même que ces rayons n'ont pas la couleur de ces corps ; mais cette teinte est d'autant plus vive qu'il y a une plus grande analogie entre leur couleur propre et celle des rayons dont on les éclaire. Ainsi, « le vermillon placé dans le rouge paraît du rouge le plus éclatant. Dans l'orangé et le jaune, il semble orangé et jaune, mais son éclat est moindre. Les rayons verts lui donnent aussi leur couleur, mais, à cause de la grande aptitude du rouge à réfléchir la lumière verte, il paraît sombre et terne ; il le devient davantage encore dans le bleu, et dans l'indigo et le violet il est presque entièrement

noir. D'un autre côté, un morceau de papier bleu foncé ou bleu de Prusse prend un éclat extraordinaire quand on l'expose aux rayons indigos. Dans le vert, il devient vert, mais avec un moindre éclat ; dans le rouge, il paraît presque noir. » (Herschel). Il faut donc comprendre la théorie de Newton dans ce sens que les surfaces des corps colorés sont en général aptes à réfléchir les rayons d'une certaine couleur en quantité beaucoup plus grande que ceux des autres rayons ; et c'est là ce qui leur donne leur couleur prédominante. Ces surfaces n'absorbent pas entièrement néanmoins les autres rayons, et c'est là ce qui les empêche d'être complètement noirs, quand on les éclaire avec une lumière dont la couleur est différente de leur couleur propre.

La coloration des corps opaques paraît due principalement aux rayons réfléchis diffusément, non aux rayons réfléchis spéculairement.

Les corps à surface polie, en effet, sont pour ainsi dire incolores, ou plutôt ne semblent colorés que des teintes des objets dont ils réfléchissent les images. Néanmoins, si parfait que soit le poli d'un miroir, il altère les couleurs des images, qui paraissent jaunies dans les miroirs à surface argentée ou dorée, rougis dans les miroirs à surface cuivrée. La teinte propre à un miroir est quelquefois difficile à constater par une réflexion simple ; mais en disposant deux miroirs pareils parallèles à une faible distance, les rayons qui arrivent à l'œil après des réflexions multipliées ont une coloration prononcée.

Les couleurs des corps sont rarement identiques avec les couleurs simples dont le spectre solaire est formé : la plupart sont composées, comme on s'en assure du reste, en les soumettant isolément à l'analyse du prisme. Cette analyse donne un spectre formé de diverses couleurs simples, et c'est le mélange qui produit la couleur particulière observée. Il suffit de regarder un objet coloré, une fleur, un morceau d'étoffe, à travers un prisme, pour voir que les bords de l'image parallèle à l'arête du prisme sont irisés.

Si, au lieu d'éclairer un corps coloré à l'aide de la lumière blanche du Soleil, ou de l'une ou de l'autre des couleurs simples dont cette lumière est formée, on l'éclaire en employant d'autres sources lumineuses, telles que la lumière d'une lampe ou certaines flammes artificielles, sa couleur se trouve altérée. Ainsi tout le monde sait que le vert paraît bleu le soir à la lumière d'une lampe ou d'une bougie. Cela tient à ce que cette lumière renferme moins de rayons jaunes que la lumière du jour : or, le vert étant une couleur qu'on obtient par le mélange du jaune et du bleu, si le jaune fait défaut ou manque en partie, la nuance résultante tire plus ou moins sur le bleu. Cette dernière remarque nous conduit à parler des couleurs qu'on obtient par le mélange des couleurs simples. Mais, auparavant, terminons ce que nous voulions dire de la théorie de Newton sur les couleurs des corps non lumineux par eux-mêmes.

Cherchant à pénétrer plus profondément dans les causes du phénomène, Newton suppose que la lumière incidente est décomposée à la surface. Une partie est absorbée, éteinte dans les corps opaques, et transmise dans les corps transparents. L'autre partie est réfléchie par les molécules superficielles, à une faible profondeur dans les corps opaques, et à des profondeurs quelconques dans les corps transparents. C'est ce qui explique pourquoi, dans ces derniers, la couleur de la lumière transmise est en général différente de celle de la lumière réfléchie. Nous avons vu, par exemple, que l'or réduit en feuilles extrêmement minces laisse passer une lumière d'un bleu verdâtre ; sa couleur réfléchie est jaune ou jaune-rougeâtre. « Halley, étant descendu sous l'eau à une profondeur de plusieurs brasses dans une cloche à plongeur, vit de couleur cramoisie le dessus de sa main, sur laquelle tombaient les rayons solaires, passant par une ouverture vitrée, tandis que le dessous, illuminé par la lumière que réfléchissaient les parties profondes de l'eau, paraissait vert ; d'où Newton conclut que l'eau laisse passer les rayons rouges et réfléchit les rayons violets et bleus. » (Daguin.)

Quelle est la modification subie par la lumière réfléchie diffu-

sément? Comment la structure des corps agit-elle sur les différents rayons colorés, pour renvoyer les uns et éteindre les autres? Est-ce la forme, la densité, le pouvoir réfringent des molécules, ou bien sont-ce ces éléments réunis qui donnent lieu au phénomène des colorations diverses? Ce sont là des questions excessivement délicates, auxquelles on ne peut encore répondre avec certitude dans l'état actuel de la science.

§ 4. CLASSIFICATION DES COULEURS.

La lumière blanche du Soleil, décomposée par le prisme, donne lieu à une série de couleurs correspondant à des degrés différents de réfrangibilité. Ces couleurs sont, pour ainsi dire, en nombre infini, puisqu'on passe d'une extrémité à l'autre du spectre par des nuances insensibles; mais il est d'usage de distinguer sept couleurs principales, dont les noms, pris dans leur ordre naturel, forment le mauvais vers alexandrin que voici :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Quelques physiciens, se fondant sur la possibilité de reproduire certaines d'entre elles par le mélange des autres, d'obtenir, par exemple, du vert par la juxtaposition du jaune et du bleu, du violet par celle du bleu et du rouge, etc., ont cherché à démontrer que le spectre n'est formé que de *trois* couleurs élémentaires. D'après Brewster, ces couleurs seraient le rouge, le jaune et le bleu; d'après Young, le rouge, le vert et le violet. Les proportions dans lesquelles ces couleurs se mélangeraient dans les diverses parties du spectre, rendraient raison de la variété des nuances dont il est composé.

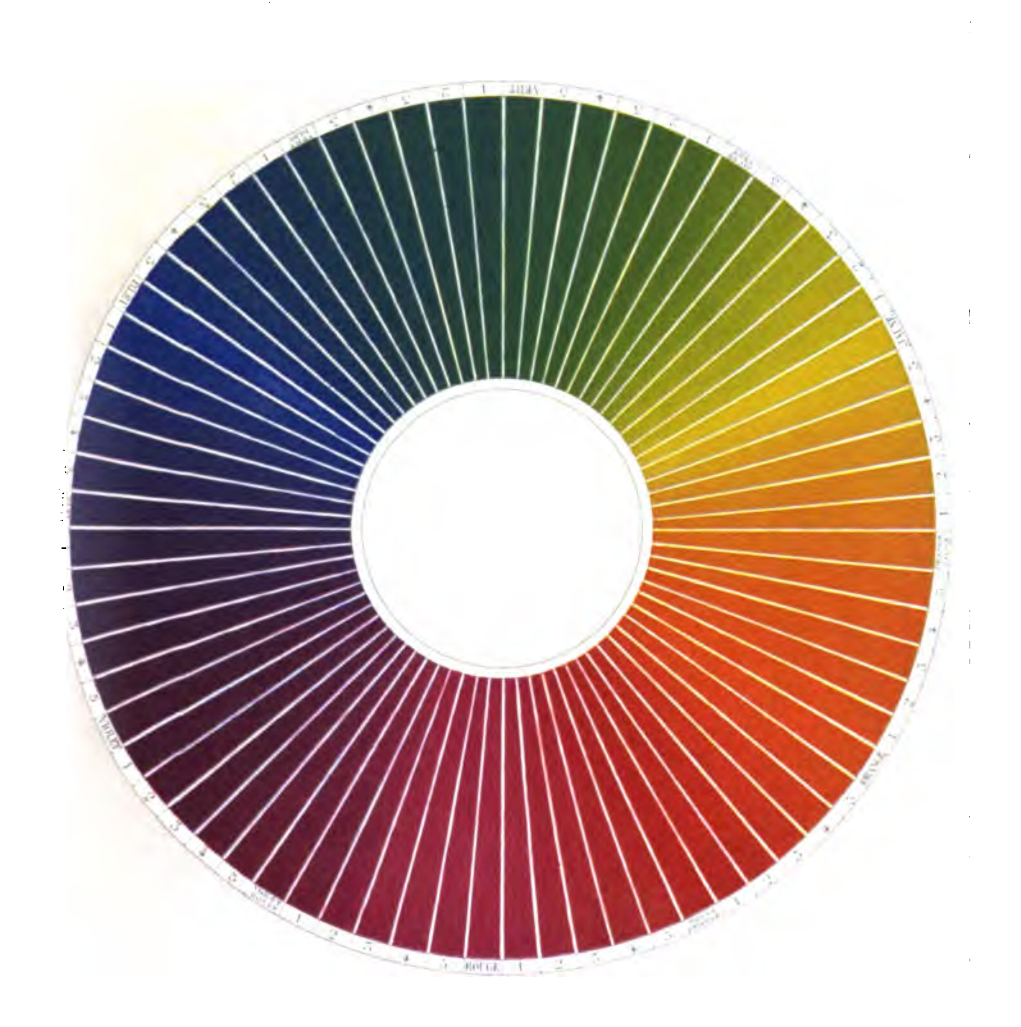
Aujourd'hui, on rejette ces dernières théories, les expériences sur lesquelles leurs auteurs les appuyaient ayant été démontrées inexactes. Toutes les couleurs du spectre sont donc des couleurs simples, dont le nombre, je le répète, peut être consi-

déré comme illimité, bien que dans la pratique on le réduise à sept couleurs principales.

Le *blanc* n'est pas une couleur simple; c'est, au contraire, la plus complexe de toutes les couleurs composées. Le *noir* n'est pas une couleur ; c'est l'absence complète de toute lumière. Quant aux couleurs composées, telles que nous les présentent les corps naturels, elles sont dues à des mélanges, en proportions variées, de toutes les couleurs élémentaires.

Une expérience bien simple démontre que le concours de tous les rayons du spectre est nécessaire pour produire le blanc parfait. Elle consiste à intercepter une partie quelconque du spectre, avant qu'il ne tombe sur la lentille qui sert à la recomposition de la lumière. « Ainsi, quand on intercepte le violet, le blanc prend une teinte jaune ; si l'on supprime ensuite successivement le bleu et le vert, le jaune devient de plus en plus rouge, et passe par l'orangé au rouge écarlate et au rouge ponceau. Si l'on commence par supprimer l'extrémité rouge du spectre, on fera passer le blanc au vert pâle, puis au vert éclatant, au bleu verdâtre, au bleu et enfin au violet, en interceptant successivement les rayons les moins réfrangibles. Si c'est le milieu du spectre qui est intercepté, la concentration du reste des rayons produira diverses nuances de pourpre, de cramoisi, etc., suivant la partie qu'on aura supprimée. On peut, en interceptant certains rayons, obtenir telle couleur que l'on voudra, et il n'y a point de nuances dans la nature que l'on ne puisse imiter ainsi parfaitement, avec un éclat et une richesse que les couleurs artificielles ne peuvent jamais atteindre. » (J. Herschel, *Traité de la lumière*.)

Le nombre des couleurs composées, obtenues par le mélange des couleurs simples ou des divers rayons colorés du spectre, s'accroît ainsi d'une façon pour ainsi dire indéfinie. Mais nous allons voir bientôt qu'il est possible de l'augmenter encore, soit par l'addition d'une certaine quantité de lumière blanche, soit par le mélange du noir en proportion variable.



CLASSIFICATION DES COULEURS

Deux couleurs qui, par leur mélange, produisent du blanc sont ce qu'on nomme des *couleurs complémentaires*.

Il y a un moyen assez simple de déterminer les groupes de couleurs qui jouissent de cette propriété : c'est d'intercepter



Fig. 208. — Sir John Herschel.

au sortir de la lentille une partie du faisceau convergent qui allait former au foyer de la lumière blanche. Cette portion reçue par un second prisme sera déviée, et donnera une couleur qui sera évidemment complémentaire de la couleur produite au foyer de la lentille, puisque, avant leur séparation, elles formaient du blanc.

proportion quelconque de noir : en ce cas, au lieu d'un blanc parfait, on n'obtiendrait qu'un gris plus ou moins foncé.

Enfin, le mélange des couleurs complémentaires ne produit du blanc que s'il n'est pas matériel ; si l'on se sert de couleurs matérielles délayées d'une façon quelconque, ou même à l'état pulvérulent, le mélange ne donnera qu'un gris plus ou moins foncé[1].

Si les couleurs, tant simples que composées, sont en nombre indéfini, si le mélange en proportions diverses de blanc ou de noir en multiplie encore le nombre, il n'en est pas moins vrai que l'œil n'en peut apprécier distinctement qu'une quantité limitée. Toutefois, s'il était possible de réunir dans une même échelle toutes les nuances de couleurs que nous offre la nature et que nous pouvons distinguer les unes des autres, nous serions étonnés de la richesse et de la magnificence de cette palette : les feuilles et les fleurs dans les plantes, les pelages des animaux, les brillantes couleurs dont sont peintes les plumes des oiseaux, les ailes des papillons et des autres insectes, les nuances des divers minéraux, des coquillages, fourniraient les éléments de la série innombrable des couleurs naturelles, et permettraient de passer d'une nuance à la suivante par gradations insensibles. On aurait ainsi une classification des couleurs tirée des objets naturels.

Les couleurs employées dans les arts sont probablement beaucoup plus restreintes : on peut se faire néanmoins une idée de leur nombre par ce fait que les Romains se servaient, dit-on, dans leurs mosaïques de plus de 30 000 teintes. Mais ce nombre même, précisément parce qu'il est considérable, a fait sentir le besoin d'une classification raisonnée des couleurs et de leurs nuances, qui permette de les définir, en rapportant l'une quelconque d'entre elles à un type fixe déterminé une fois pour toutes. Tout le monde sait que, dans l'industrie et dans les arts, la nomenclature des couleurs est fort arbitraire

1. L'expérience de Newton, que nous avons citée plus haut (p. 161), le prouve.

ou, du moins, qu'elle varie d'un art ou d'une industrie à l'autre : les noms sont empruntés à des objets naturels, minéraux, fleurs, fruits, animaux, mais il n'y a entre eux aucun lien de gradation. C'est pour obvier aux inconvénients qui résultent de cette confusion que notre savant et illustre compatriote M. Che-



Fig. 209. — M. Chevreul.

vreul a proposé une classification des couleurs et de leurs nuances, dont nous allons indiquer les principes et la base.

Selon M. Chevreul, une matière colorée par l'une quelconque des couleurs du spectre ne peut être modifiée que de quatre manières différentes :

1° Par du *blanc*, qui, en l'éclaircissant, en affaiblit l'intensité;

2° Par du *noir*, qui, en l'assombrissant, en diminue l'intensité spécifique ;

3° Par une *certaine couleur* qui en change la propriété spécifique sans la ternir ;

4° Enfin, par une *certaine couleur* qui en change la propriété spécifique en la ternissant, de sorte que si l'effet est porté au maximum, il en résulte du noir, ou du gris normal représenté par du noir mêlé de blanc dans une certaine proportion.

Pour exprimer toutes ces modifications, M. Chevreul emploie les expressions suivantes, qui, une fois définies, ne peuvent plus prêter à l'équivoque :

Il appelle « *tons* d'une couleur les différents degrés d'intensité dont cette couleur est susceptible, suivant que la matière qui la présente est pure ou simplement mélangée de blanc ou de noir ; *gamme*, l'ensemble des tons d'une même couleur ; *nuances* d'une couleur, les modifications qu'elle éprouve par l'addition d'une autre couleur qui la change sans la ternir ; enfin, *gamme rabattue*, la gamme dont les tons clairs comme les tons foncés sont ternis par du noir. »

Voici maintenant comment il a procédé pour obtenir une échelle, suffisamment étendue, des couleurs principales, de leurs tons et de leurs nuances.

Ayant divisé un cercle en 72 secteurs égaux, il plaça à égale distance trois échantillons de laine teinte, l'un rouge, l'autre jaune, le troisième bleu, aussi francs, aussi purs que possible et de même intensité. Puis, entre ces trois secteurs et à égale distance de chacun d'eux, il mit de l'orangé entre le rouge et le jaune, du vert entre ce dernier et le bleu, du violet entre le bleu et le rouge. En procédant de la même manière par des intercalations successives de couleurs de nuances intermédiaires, il obtint enfin ce qu'il nomme le cercle chromatique des couleurs franches, reproduisant en quelque façon le spectre de la lumière solaire. C'est le cercle qu'on voit représenté dans la planche IV.

Ces 72 nuances obtenues, il prit chacune d'elles pour com-

poser une gamme complète formée par l'addition de quantités croissantes de blanc et de noir, de manière à avoir dix tons rabattus, et dix tons de la même couleur éclaircis jusqu'au blanc. Chaque gamme comprend ainsi, du blanc pur au noir pur qui en sont les extrémités, 20 tons différents, dont la couleur franche est le dixième, à partir du blanc.

De cette première combinaison il résulte déjà 1440 tons différents, tous déduits du cercle chromatique des couleurs franches; mais, en rabattant successivement les 72 tons de ce cercle par l'addition de 1, 2, 3, etc... dixièmes de noir, on forme neuf cercles des couleurs rabattues, et chacun des 72 tons qu'ils comprennent devenant à son tour le type d'une gamme de 20 tons nouveaux procédant du blanc au noir, il en résulte, pour la série totale, une échelle de 14400 tons, auxquels il faut ajouter encore les 20 tons du gris normal, ce qui fait, en définitive, 14420 tons différents.

Il est évident qu'une échelle aussi étendue doit suffire pour la plupart des applications scientifiques et industrielles, et que, la plupart du temps, elle dépassera les besoins des artistes. Malheureusement, la reproduction matérielle rigoureusement exacte de toutes ces couleurs est d'une grande difficulté, et il n'est pas moins difficile de conserver les types une fois qu'ils sont obtenus. Il faudrait reproduire la construction chromatique de M. Chevreul en couleurs inaltérables, par exemple en tableaux émaillés sur porcelaine : les recherches scientifiques ne seraient pas moins intéressées que les arts à posséder des types fixes, auxquels les couleurs des objets naturels, si souvent altérées par le temps, seraient rapportées à l'aide de numéros d'ordre, et de la sorte faciles à reproduire.

§ 5. COULEURS DES CORPS TRANSPARENTS OU LUCIDES. — DICHROÏSME.

Les corps ou milieux qui sont doués au plus haut degré de la transparence, comme l'air, l'eau, le verre, ne possèdent pas

cette propriété d'une façon absolue. Une partie plus ou moins considérable de la lumière qui les traverse est absorbée, et c'est ce qu'il est aisé de constater quand on accroît suffisamment l'épaisseur de ces milieux. Quand la lumière qui pénètre dans un milieu transparent est la lumière blanche, et qu'après son passage elle est restée blanche, on dit que le milieu est incolore ; on explique ce phénomène d'une manière très simple, en admettant, ou bien qu'il n'y a eu absorption d'aucun des rayons colorés qui composent la lumière blanche, ou bien, si cette absorption a eu lieu, qu'elle a été la même pour tous les rayons. L'air, un certain nombre d'autres gaz simples ou composés, la vapeur d'eau sont des milieux transparents incolores : il en est de même, mais pour des épaisseurs beaucoup moindres, de l'eau, du verre et de certains cristaux. En réalité, cette propriété n'est pas plus absolue que la transparence : la lumière transmise par des couches d'air suffisamment épaisses est nuancée de diverses couleurs qui varient du bleu plus ou moins intense au bleu verdâtre, au jaune, au rouge. Ces dernières teintes sont particulières aux couches les plus basses de l'atmosphère, vues un peu avant ou un peu après le coucher du soleil. L'eau prend également une teinte qui dépend de sa pureté et de sa profondeur dans les rivières, les lacs et la mer. Enfin tout le monde sait que le verre qui, sous une très faible épaisseur, semble le plus incolore, se teinte de nuances qui dépendent de sa composition quand la lumière blanche est transmise au travers de lames d'une épaisseur plus grande.

Cette coloration des milieux transparents s'observe de même et d'une façon plus prononcée dans les corps ou milieux qui sont simplement translucides.

De même qu'on explique les couleurs des corps opaques par l'absorption inégale des rayons diffusés de réfrangibilités diverses, on rend compte de la coloration des corps transparents par l'absorption inégale des rayons transmis. Dans le premier cas, la lumière qui rend les corps visibles et que nous supposons blanche est décomposée par réflexion diffuse ; dans le

second cas, elle est décomposée par transmission. En s'exprimant ainsi d'ailleurs, on ne fait que constater un fait, une propriété évidente des corps, sans rien préjuger de la nature intime du phénomène ; la cause véritable de cette décomposition, qui dépend sans doute de l'arrangement moléculaire, de la composition physique et chimique des corps, est encore inconnue, ou du moins n'a donné lieu qu'à des hypothèses entre lesquelles se partagent les physiciens.

Des lames de verre de couleur posées sur un fond noir sont presque invisibles ; il en est de même des liquides transparents colorés renfermés dans des vases dont les parois sont noircies. C'est donc la lumière transmise, non la lumière réfléchie qui nous fait voir ces corps. Ainsi un verre rouge est celui qui, laissant passer les rayons rouges, absorbe ou éteint tous les autres rayons du spectre de la lumière blanche ; qui, du moins, absorbe ces rayons dans une proportion beaucoup plus considérable que les rayons rouges. Des verres, des liquides jaunes, verts, bleus, violets sont ceux qui ne laissent passer que les rayons jaunes, verts, bleus, violets et qui absorbent les autres, soit en totalité, ce qui arrive rarement, soit du moins en assez forte proportion pour que les rayons qui passent composent la teinte indiquée par ces couleurs. La réflexion spéculaire, sur leurs surfaces polies, d'un objet blanc donne une image blanche, tandis que l'image de l'objet vu par transmission est colorée de la même teinte que le milieu.

Une expérience très simple, déjà décrite dans le chapitre où nous avons traité de l'absorption de la lumière, montre l'inégalité d'absorption des rayons de réfrangibilités diverses par un même milieu coloré. Qu'on prenne une lame de verre rouge et qu'on l'interpose sur le passage d'un faisceau de lumière solaire, avant ou après sa décomposition par le prisme : le spectre obtenu ne renferme plus que la partie la moins réfrangible et se réduit au rouge, si la teinte du verre coloré est bien homogène. Avec un verre bleu de cobalt d'une certaine épaisseur, le spectre est réduit au violet, et, à l'autre extrémité, à

une mince bande de rouge extrême; si le verre a été lui-même taillé en forme de prisme ou de biseau aigu, et qu'on examine le spectre solaire en interposant des parties de plus en plus épaisses du verre de cobalt entre le spectre et l'œil, on verra que l'absorption des rayons intermédiaires entre le violet et le rouge extrême va en croissant avec l'épaisseur. A partir d'un millimètre, c'est le milieu du rouge qui est éteint le premier; puis à des épaisseurs croissantes disparaissent successivement le rouge orangé, le jaune, le vert et enfin le bleu.

Le biseau de verre de cobalt, doublé d'un prisme de verre blanc qui forme avec lui une lame à faces parallèles, paraît bleu en effet en se fonçant de plus en plus, depuis sa partie la plus mince jusqu'à une certaine épaisseur; après quoi, le rouge prédominant, le verre paraît rouge lui-même, changeant ainsi de nuance, en même temps que varie la proportion des rayons absorbés. Cette teinte rouge provient évidemment des rayons rouges extrêmes, plus vifs que les rayons violets.

Nous avons eu déjà l'occasion de mentionner ce phénomène singulier de changement de couleur, que les physiciens nomment *dichroïsme*, ou plus généralement *polychroïsme*, attendu qu'en variant les épaisseurs de certaines substances transparentes, on obtient des teintes ou couleurs multiples. Le plus souvent, la nuance de la couleur change seule avec l'épaisseur. Ainsi les verres rouges deviennent plus foncés et leur couleur plus pure. Les verres verts, des dissolutions de sels de cuivre ou de nickel, qui absorbent principalement les rayons des couleurs extrêmes, le rouge et le violet, ont une teinte verte d'autant plus prononcée que leur épaisseur est plus grande. Le perchlorure de fer, le chlorure d'or, l'infusion de safran, le vin de Porto qui absorbent les rayons les plus réfrangibles et laissent à peu près également passer les rayons rouges et les rayons jaunes, paraissent jaunes sous une faible épaisseur, puis brunissent si cette épaisseur augmente et enfin arrivent au rouge. Citons quelques substances dichroïques : les solutions de chlorure de chrome, de manganate de potasse,

l'eau céleste ou solution saturée de sulfate de cuivre dans le carbonate d'ammoniaque. Les premières paraissent vertes, puis rouges; la dernière paraît bleue quand elle est en lames minces, et violette quand l'épaisseur atteint dix à douze centimètres.

Deux liquides, l'un rouge et l'autre vert ou bleu, forment mélangés un milieu dichroïque, pourvu que leur mélange ne donne pas lieu à une combinaison chimique.

Un verre bleu de cobalt, comme nous venons de le voir, paraît rouge lorsque son épaisseur est telle, qu'il absorbe tous les rayons jaunes, verts et bleus de la partie moyenne du spectre. Au contraire, une plaque mince de sulfate de cuivre absorbe les rayons extrêmes, violets et rouges. Que doit-il donc se passer si l'on superpose deux lames de ces substances? C'est que l'absorption aura lieu pour les rayons du spectre de toutes les couleurs. Et, en effet, l'ensemble des deux lames forme un milieu opaque.

Brewster a reconnu que la chaleur modifie les propriétés absorbantes d'un milieu coloré : tantôt elle la diminue, tantôt elle l'augmente. Nous renverrons le lecteur à la citation que nous avons faite plus haut (p. 269) des expériences du physicien anglais.

Tous les faits que nous venons de décrire se rapportent aux milieux colorés transparents. Les milieux simplement translucides offrent des phénomènes analogues : seulement, ils sont à la fois visibles par transmission et par réflexion; de sorte que leur couleur est visible alors même qu'on les place en avant d'un fond noir. Un liquide parfaitement limpide, comme une solution de chromate de potasse, perd sa transparence et devient translucide, si l'on y projette un peu de sulfate de baryte; mais il conserve sa teinte jaune, qui se voit alors aussi bien par réflexion que par transmission.

Ce sont sans doute de très petites particules en suspension dans l'eau qui lui donnent diverses teintes, bleues, jaunes, rougeâtres, selon la nature des particules. Mais il ne faut confondre cette cause de coloration ni avec la teinte propre au liquide lui-

même, ni avec celle qu'il prend en transmettant par réflexion la couleur du fond sous lequel il repose.

Il y a des corps gazeux qui ont une coloration particulière : telle est la vapeur d'iode, dont la magnifique teinte violette a donné son nom au métalloïde; l'acide azotique émet des vapeurs blanches à l'air et l'acide hypoazotique d'épaisses vapeurs rougeâtres. Citons enfin le chlore, qui tire son nom de la teinte jaune-verdâtre de ce gaz.

L'air, qui est, comme on sait, un mélange de deux gaz, l'oxygène et l'azote, renfermant en outre une certaine proportion de gaz acide carbonique et le plus souvent de la vapeur d'eau, a une couleur bleue que tout le monde connaît et qui se modifie, se fonce ou s'éclaircit selon les circonstances atmosphériques. Est-ce une couleur propre au mélange gazeux lui-même, qui absorberait les rayons bleus de la lumière blanche du soleil, ne transmettant que les rayons rouges; de sorte que la couleur bleue serait vue par réflexion soit sur les molécules de l'air lui-même, soit sur celles de la vapeur d'eau en suspension? Ce sont là des questions encore non résolues, ou du moins dont les solutions différentes partagent encore aujourd'hui les physiciens. Entrons, sur ce point, dans quelques détails.

§ 6. COULEUR BLEUE DE L'ATMOSPHÈRE.

Léonard de Vinci croyait, comme Gœthe plus tard, « que le bleu d'un ciel sans nuages était dû au passage de la lumière blanche à travers l'atmosphère contenant des particules finement divisées. Newton expliquait la couleur bleue du ciel par l'existence, dans l'atmosphère, de vésicules d'eau creuses et très petites sur lesquelles, comme sur une bulle de savon, les couleurs deviennent perceptibles; selon que l'épaisseur des parois de ces vésicules augmentait, la couleur devait passer du bleu au jaune, à l'orangé et au rouge, et ainsi par des réflexions très fréquentes on pouvait expliquer les différentes

teintes, depuis le bleu du ciel jusqu'au rouge du coucher du soleil. Clausius, se basant sur cette théorie, a calculé les intensités relatives de la lumière directe du soleil et de la lumière diffuse du ciel pour les différentes hauteurs du soleil.

« Quelques physiciens, dit M. Roscoë, ont affirmé que l'air lui-même a une couleur bleue, tandis que d'autres ont avancé que si l'air prend une teinte bleue sous l'influence de la lumière *réfléchie*, il doit paraître rouge par la lumière *transmise*.

« D'autres enfin, pour éviter la difficulté d'expliquer la grande variété des teintes au coucher du soleil, ont avancé que ces teintes sont une illusion optique ou qu'elles sont causées par la présence de nuages qui reçoivent et répètent la couleur!

« Plusieurs physiciens ont suggéré que, l'atmosphère étant remplie de petites particules de matières solides flottantes, elle agit comme un milieu opalescent et ne transmet que de la lumière rouge; mais c'est à Brücke que nous devons un exposé complet et un examen approfondi de cette théorie. Forbes explique le phénomène d'une manière toute différente; car, en observant que, dans certaines circonstances, la vapeur aqueuse ou plutôt l'eau en particules très divisées peut absorber les rayons bleus, et que le soleil paraît rouge quand on le voit à travers une partie d'un jet de vapeur, il attribue la teinte rouge que revêt le ciel au moment du coucher du soleil uniquement à la présence de l'eau dans cet état particulier de division. »

Après avoir ainsi fait l'historique de la question, le savant anglais que nous citons décrit les observations et expériences sur laquelle repose sa propre opinion. Selon lui, l'atmosphère exerce une absorption d'une nature particulière sur les rayons d'une haute réfrangibilité, c'est-à-dire sur les rayons du spectre qui ont une grande activité chimique; de nombreuses séries d'observations lui ayant montré que la lumière diffuse du ciel a une activité chimique proportionnellement beaucoup plus forte que la lumière directe du soleil, l'ont amené à considérer cette absorption, à laquelle il donne le nom d'*opalescence*,

comme ayant pour cause la présence dans l'atmosphère d'une multitude de particules finement divisées qui réfléchissent les rayons bleus et ne transmettent que les rayons rouges. Que sont ces particules? Les sporules qui causent la fermentation et la putréfaction, les molécules minérales, comme le sodium dont l'analyse spectrale accuse la présence presque constante dans l'air, peut-être aussi la poussière météorique extra-terrestre que certains physiciens prétendent traverser en tout temps notre atmosphère, enfin probablement aussi les fines particules aqueuses dont cette atmosphère est remplie. Roscoë compare l'opalescence de l'atmosphère à celle des liquides qui renferment de la matière très ténue, par exemple de l'eau contenant du soufre finement divisé, ou à celle du verre dans la masse duquel sont disséminées des particules de phosphate de calcium ou de trioxyde d'arsenic. « Si l'on fait passer, dit-il, la lumière blanche d'une lampe électrique à travers un tube de trois pieds de long, fermé à chaque extrémité par des plaques de verre et rempli d'un liquide à peine opalescent, tous les rayons bleus, verts et jaunes sont interceptés, et le rayon sortant est rouge foncé. Nous avons là un coucher de soleil artificiel. Le soufre finement divisé réfléchit la lumière bleue et transmet la lumière rouge. Si le soufre opalescent diminue d'un tiers la lumière visible, il intercepte entièrement les rayons chimiques. Le verre opale paraît blanc ou blanc-bleuâtre par la lumière réfléchie et rouge par la lumière transmise.

« Enfin, selon la grosseur des particules réfléchissantes, la teinte peut varier du rouge foncé au jaune et même au bleu. Ainsi s'expliqueront les nuances si variées des crépuscules et des aurores. »

Un autre physicien anglais, Tyndall, est arrivé à des conclusions à peu près semblables à celles de Roscoë. Mais il a cherché à pénétrer plus profondément dans la nature intime du phénomène; nous ne pouvons ici rapporter toutes ses expériences, mais voici une page du savant physicien où se trouve ingénieusement interprétée la cause de la coloration bleue du ciel :

« En réalité, l'agent, quel qu'il soit, qui nous envoie la lumière du ciel, exerce une action dichroïque. La lumière réfléchie est bleue ; la lumière transmise est orangée ou rouge. Il y a donc là une différence marquée entre la substance du ciel et celle d'un nuage ordinaire, lequel n'exerce aucune action dichroïque de ce genre. En combinant les forces de l'imagination et de la raison, nous pouvons pénétrer ce mystère aussi. Le nuage ne tient pas compte de la grandeur des ondulations de l'éther, mais les réfléchit toutes également ; il ne choisit pas. Or ceci peut provenir de ce que les parcelles du nuage sont si grandes par rapport aux ondes de l'éther, qu'elles les réfléchissent toutes indifféremment.... Supposons que les parcelles réfléchissantes, au lieu d'être très grandes, soient très petites par rapport aux ondes. Dans ce cas, ce n'est plus l'onde tout entière qui est arrêtée et renvoyée en grande partie, une petite portion seulement est brisée et réfléchie. La grande masse de l'onde passe par-dessus cette petite parcelle sans éprouver de réflexion. Jetons donc par la pensée dans notre atmosphère une poignée de ces petites parcelles étrangères et chargeons notre imagination de suivre leur action sur les ondes solaires. Des ondes de toute grandeur se heurtent contre ces parcelles, et l'on voit à chaque choc une partie de l'onde frappée se détacher par réflexion. » Tyndall compare alors les ondes rouges aux vagues de l'Océan et les ondes bleues aux simples rides de l'eau, et montre que les particules de l'atmosphère doivent réfléchir en plus grande proportion les plus petites ondes, de sorte que le bleu sera la couleur dominante de la lumière réfléchie.

« Occupons-nous maintenant, continue-t-il, de la lumière qui passe entre les parcelles sans être dispersée. Que devient-elle en définitive? Par ses chocs successifs avec les parcelles, la lumière blanche perd de plus en plus la proportion de bleu qu'elle doit contenir. On prévoit facilement ce qui va en résulter. La lumière transmise à de petites distances doit paraître jaunâtre. Mais à mesure que le soleil descend vers l'horizon,

l'épaisseur de l'atmosphère traversée augmente, et avec elle le nombre des parcelles qui dispersent la lumière. Elles lui font perdre successivement le violet, l'indigo, le bleu, et troublent même les proportions du vert. La lumière transmise dans ces circonstances doit passer du jaune à l'orangé, puis au rouge. C'est là exactement ce que nous présente la nature. Ainsi, tandis que la lumière réfléchie nous donne à midi l'azur foncé du ciel des Alpes, la lumière transmise nous donne au soleil couchant le rouge chaud des neiges des Alpes. Assurément, les phénomènes se passent comme si notre atmosphère était un milieu rendu légèrement trouble par des parcelles étrangères d'une extrême ténuité, qui y seraient maintenues mécaniquement en suspension. »

Nous devons mentionner ici les expériences d'un savant français, M. A. Dupasquier, qui, dès 1845, constatait l'influence des particules finement divisées sur la coloration bleue des milieux où ces particules se trouvent en suspension. L'argent, le mercure, le bismuth, l'arsenic, l'antimoine en poudre, divers composés métalliques, en suspension dans un liquide, lui ont tous montré à divers degrés une teinte bleuâtre, et il se demandait si l'on ne pouvait expliquer de la même manière « certaines colorations bleues que présente la nature, celle des glaciers par exemple, qui pourrait être due à leur état de granulation, et celle des lacs, qui pourrait peut-être avoir pour cause des particules hétérogènes très subtiles, tenues en suspension dans une masse d'eau d'une grande épaisseur. » Ces questions ont été étudiées en effet depuis et résolues, notamment par Tyndall, dans le sens qu'indiquait il y a trente ans notre compatriote.

L'illumination des milieux transparents a été l'objet de nouvelles études très intéressantes par M. Lallemand ; mais, outre que ces études ne sont pas terminées, leur exposé nous entraînerait à des considérations plus élevées que ne le comporte cette simple description des phénomènes de la lumière et des couleurs.

§ 7. INFLUENCE DES LUMIÈRES ARTIFICIELLES SUR LES COULEURS DES CORPS.

Tout le monde sait que les couleurs ne sont pas les mêmes à la lumière du jour, et le soir à la lumière des lampes, des bougies ou du gaz. Comme on est convenu d'appeler les premières *couleurs naturelles*, il en résulte que les lumières autres que la lumière solaire, et notamment les lumières artificielles, altèrent plus ou moins les couleurs. Telle étoffe qui paraît bleue le jour semble verte le soir, et, inversement, tel vert paraît bleuâtre. Cet effet a une certaine importance pour les toilettes des dames, pour les décorations et tentures dans les salons et au théâtre. Ici nous n'avons à en parler qu'au point de vue de la cause de ces altérations, dont l'analyse prismatique des flammes suffit à rendre compte. Nous emprunterons quelques détails et faits curieux à un travail effectué sur ce sujet par un chimiste français, M. Nicklès.

Ce savant reconnut que le perchlorure de manganèse combiné avec l'éther forme une substance qui au grand jour est d'un beau vert; à la lumière du gaz elle paraît noire.

Un pigment d'un beau rouge cramoisi, emprunté au troène, colore en bleu certaines dissolutions salines. Telle est du moins la couleur obtenue au jour. Éclairées par le gaz, ces dissolutions bleuies prennent des teintes diverses : rouge, si la dissolution renferme du bicarbonate de chaux ou du chlorure de zinc; verte, si c'est l'azotate de chaux ou le chlorure de calcium; elle reste bleue, si c'est du bicarbonate de potasse.

Or ces changements de couleur ne se produisent pas si, au lieu d'éclairer au gaz les dissolutions précédentes, on se sert de la lumière au magnésium. Il en est de même pour la combinaison éthérée du perchlorure de manganèse, laquelle reste verte à la lumière du magnésium comme au jour. Enfin l'éclairage par la lumière électrique laisse aussi sensiblement aux corps les couleurs qu'on leur voit à la lumière du soleil.

A quoi tient cette différence entre la lumière du magnésium ou de l'arc voltaïque et la lumière donnée par le gaz de houille, l'huile des lampes, la stéarine de nos bougies? Au sodium que ces dernières contiennent toujours en petite quantité, mais en quantité suffisante pour donner aux flammes la teinte jaune qui provient de la raie du spectre sodique. Les expériences ne laissent à cet égard aucun doute : en effet, à la lumière monochromatique du sodium, nous savons que toutes les couleurs du spectre, le jaune excepté, s'éteignent. C'est ce qui explique les effets que décrit M. Nicklès. Ayant éclairé à la lumière sodique des papiers colorés, les uns en vert (manganate de baryte), les autres en orangé (bi-iodure de mercure), d'autres en jaune de chrome, toutes couleurs magnifiques au jour, moins belles déjà à la lampe à gaz, il constata que le vert était devenu noir, tandis que le jaune et l'orangé paraissaient blancs. Des cristaux verts d'acétate de cuivre, des cristaux rouges de nitroprussiate de soude, d'iodure d'antimoine et d'arsenic, paraissent noirs à la lumière jaune du sodium, qui altère aussi la couleur verte des feuilles, et ne fait guère que changer de ton les bleus, sauf le bleu de troène. Le chlorure de cobalt cristallisé, qui a une couleur de rose à la température ordinaire, prend une teinte bleue magnifique quand on le chauffe dans un ballon. Or la flamme du sodium n'altère point cette couleur, alors, comme nous venons de le voir, qu'elle est si défavorable à la plupart des autres couleurs.

La lumière de la lampe sodique donne une teinte cadavérique, d'un vert livide, aux mains et à la figure des personnes qu'elle éclaire; leurs lèvres paraissent d'un bleu violet. « Ces teintes, dit M. Nicklès, sont évidemment dues au bleu, qui seul a pu résister aux effets d'extinction causés par la flamme de soude. Du reste, ce vert livide est connu de quiconque a vu flamber du punch ou un pudding, car ici c'est l'alcool salé qui est en jeu... Heureusement cet effet s'arrête avec la cause qui l'a produit; heureusement aussi les flammes qui servent à notre éclairage ne sont pas saturées de sodium, autrement nous serions exposés

la nuit à voir tout en bleu. Elles ne sont pas saturées de sodium, cependant elles sont suffisamment jaunes pour former du vert avec certains bleus. Voilà pourquoi sans doute certaines étoffes bleues paraissent vertes la nuit, et voilà aussi pourquoi, dans une pièce bien éclairée, il peut arriver qu'une robe verte se distingue difficilement d'une robe bleue ; car le vert peut être noirci quelque peu, tandis que le bleu formera du vert avec la lumière jaune de l'éclairage.

Au point de vue des arts, ces expériences ont un certain intérêt. La flamme sodique ayant la propriété d'abolir pour ainsi dire les couleurs, un tableau ne s'y montre que comme un dessin dont le modelé subsiste grâce aux demi-teintes. C'est à peu près l'effet que produit la photographie. Mais il nous semble que, dans le premier cas, l'absorption n'étant pas proportionnelle pour toutes les couleurs, il doit en résulter une altération des valeurs relatives des tons, comme cela arrive aussi dans les meilleures photographies.

CHAPITRE XVI

PHOTOMÉTRIE

§ 1. PRINCIPES DE PHOTOMÉTRIE.

Nous savons tous, par une expérience de tous les jours, que le pouvoir éclairant d'une lumière varie selon la distance à laquelle l'objet éclairé se trouve de la source. Quand nous lisons le soir à la clarté d'une lampe, d'une bougie, nous pouvons aussi remarquer que, sans changer la distance où nous sommes du flambeau, il nous est possible, en inclinant d'une certaine façon les pages de notre livre, d'obtenir des degrés d'éclairement très variables; enfin, si au lieu d'une bougie nous en plaçons plusieurs à la même distance, ou encore si, au lieu d'une petite lampe, nous nous servons d'une lampe de plus grand modèle dont la mèche donne une flamme plus étendue, il n'est pas moins évident pour nous que l'illumination sera augmentée dans une certaine proportion.

D'autre part, le pouvoir éclairant varie avec la nature des sources lumineuses, toutes choses égales d'ailleurs. La flamme d'un bec de gaz nous paraît beaucoup plus éblouissante que celle qui provient de la combustion d'une lampe alimentée avec de l'huile; la lumière de la Lune est infiniment moins vive que celle du Soleil, bien que les disques des deux astres aient à peu près la même grandeur apparente.

Il y a donc à distinguer, quand on veut apprécier l'intensité des sources de lumière, certaines circonstances, dont les unes

sont inhérentes aux sources elles-mêmes, dont les autres sont particulières aux objets éclairés par elles, telles que la distance, l'inclinaison, etc. Ce sont tous les problèmes relatifs aux appréciations de ce genre qui constituent la branche de l'optique appelée *photométrie*, de deux mots grecs qui signifient : le premier *lumière*, le second *mesure*.

Rien n'est plus délicat, plus difficile que la mesure des intensités lumineuses. Malgré tous les progrès réalisés dans la science de l'optique, on ne possède pas encore d'instruments qui donnent cette mesure avec une exactitude comparable à celles des autres éléments physiques. Le baromètre, le thermomètre inscrivent avec une sensibilité extrême, l'un la pression de l'atmosphère, l'autre la température ; on sait apprécier la hauteur relative de deux sons avec une grande délicatesse. La photométrie est loin d'être aussi avancée, et la comparaison des intensités de deux lumières laisse toujours beaucoup à désirer. D'où vient l'infériorité que nous signalons ? C'est que nous n'avons pas d'autre critérium ici que l'organe à l'aide duquel nous percevons la lumière. C'est la sensation de la vue qui est le seul juge, et, en dépit de sa sensibilité excessive, l'œil est peu apte à prononcer sur les rapports numériques de deux ou plusieurs lumières qui se trouvent simultanément ou successivement en sa présence.

Alors même qu'il s'agit de juger de l'identité de deux sources, la difficulté est grande. Si les observations ne sont pas simultanées, la comparaison sera d'autant plus difficile qu'il s'écoulera entre elles un plus grand intervalle de temps. Il faut donc d'abord faire en sorte, et cela n'est pas toujours possible, que les deux lumières soient observées en même temps[1]. Le plus

1. « Dans ce sens, dit J. Herschel dans son *Traité de la Lumière*, l'œil ne peut pas plus servir à donner la mesure de la lumière, que la main à donner le poids d'un corps pris au hasard. Cette incertitude s'accroit encore par la nature même de l'organe, qui est dans un état de fluctuation continuelle, dû à l'ouverture plus ou moins grande de la pupille, qui se contracte ou se dilate par l'excitation de la lumière même, et à la sensibilité variable des nerfs optiques. Que l'on compare seulement l'éclat éblouissant d'un éclair dans une nuit obscure avec la sensation produite en plein jour par la même cause : dans le premier cas, l'œil est péniblement affecté, et l'agitation violente qu'éprouvent les nerfs optiques de la

souvent l'éclat des sources éblouit l'œil, le blesse, le rend incapable de juger avec tant soit peu de précision, et voilà pourquoi les physiciens, au lieu de comparer entre elles les sources de lumière elles-mêmes, observent des surfaces de même nature, éclairées par ces sources dans les mêmes conditions d'inclinaison et de distance. Enfin, il est encore une cause d'incertitude dont il ne paraît pas aisé de se débarrasser : c'est la diversité des couleurs des lumières qu'on met en regard. « Entre deux lumières diversement colorées, dit J. Herschel, on ne peut établir aucun parallèle susceptible de précision ; et l'incertitude de notre jugement est d'autant plus grande que cette différence de coloration est plus considérable. »

Malgré toutes ces difficultés, on est parvenu à établir, soit par le raisonnement, soit par l'expérience, un certain nombre de principes qui ont suggéré l'invention de divers appareils photométriques dont nous décrirons tout à l'heure les principaux. Aujourd'hui que l'éclairage public ou privé a pris une extension considérable, que l'on sent le besoin de favoriser la navigation sur les côtes, en projetant au loin sur la mer les feux des phares, les photomètres sont devenus des instruments d'une grande utilité pratique ; mais les premiers procédés imaginés pour la comparaison des sources de lumière, sont dus à des savants qui se préoccupaient uniquement du côté scientifique du problème. Dès le dix-septième siècle, Auzout et Huygens, dans le siècle suivant, André Celsius, Bouguer et Wollaston, cherchèrent à déterminer l'éclat relatif des lumières des astres, par exemple l'intensité de la lumière du Soleil, comparée à celle de la Lune ou des plus brillantes étoiles.

Le premier principe qu'ils ont mis en évidence est le suivant : Quand la distance d'un point lumineux à l'objet qu'il éclaire varie, l'intensité qui émane de ce point varie *en raison*

rétine se manifeste encore quelques instants après à notre imagination par une succession rapide et alternative de lumière et d'obscurité. Pendant le jour, il ne se produit point d'effet semblable, et nous suivons les zigzags de la foudre avec la plus grande facilité, et sans être frappés de cet éclat prodigieux que fait ressortir si vivement l'obscurité qui précède et qui suit l'éclair. »

inverse du carré de la distance. Et en effet, le point lumineux rayonne de la lumière dans tous les sens avec une égale force; mais ces rayons divergent d'autant plus que la distance augmente davantage. S'ils sont arrêtés sur la surface d'une sphère d'un certain rayon, ils produiront sur un élément *m* de cette sphère une illumination d'une intensité déterminée ; si, poursuivant leur chemin, ils sont arrêtés sur une sphère de rayon double, les mêmes rayons, qui se trouvaient répandus sur la surface *m*, le seront sur la surface M de la nouvelle sphère. Or la géométrie nous apprend que M est quatre fois aussi étendu que *m*, et comme c'est la même quantité de lumière qui se trouve répartie sur une surface quatre fois plus grande, on en conclut que son intensité doit être quatre fois moindre. A une distance triple, l'intensité serait neuf fois moins grande. En général, elle diminue donc de la même manière que le carré de la distance augmente.

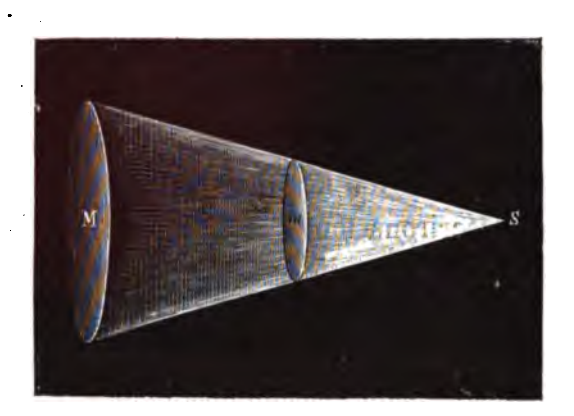


Fig. 210. — Loi du carré des distances.

Cette loi, du reste, n'est vraie qu'autant que l'on fait abstraction de l'absorption des rayons lumineux par les milieux dans lesquels ils se meuvent. Mais elle s'applique aussi au cas où la source de lumière n'est plus un simple point lumineux, et offre une surface apparente appréciable, pourvu qu'elle soit assez éloignée de l'objet éclairé, pour que ce dernier puisse être considéré comme étant à la même distance de tous les points de la source.

Il résulte de ce premier principe de photométrie que, si l'on présente à la lumière d'une bougie, par exemple, un morceau de papier blanc, et qu'on l'en éloigne successivement à des

distances 2, 3, 4 fois plus grandes, l'éclat deviendra à peu de chose près 4, 9, 16 fois moins intense. Mais il faut pour cela que le papier soit toujours placé perpendiculairement à la direction des rayons lumineux. Si, sans changer la distance, on incline le papier sur cette direction, il est évident que l'éclairement devra diminuer, puisque la même surface interceptera un nombre moindre de rayons. La quantité de lumière reçue varie alors selon une loi qu'on nomme la *loi des cosinus*, parce qu'elle est proportionnelle aux cosinus des angles que fait la direction des rayons lumineux avec la perpendiculaire à la surface éclairée.

Dans tout ce que nous venons de dire, il ne s'agit que du pouvoir éclairant de la source de lumière, non de son éclat intrinsèque. Si cet éclat intrinsèque ne varie pas, il est clair que le pouvoir éclairant sera d'autant plus considérable que la surface de la source sera elle-même plus grande, comme aussi au cas où l'éclat intrinsèque augmenterait, le pouvoir éclairant augmenterait dans la même proportion.

Une conséquence des principes qui précèdent, c'est qu'une source lumineuse conserve le même éclat intrinsèque apparent quelle que soit la distance où elle se trouve de notre œil. A la vérité, la quantité de lumière qui pénètre par l'ouverture de notre pupille, diminue en raison inverse du carré de la distance. Mais, comme elle émane d'une surface lumineuse dont le diamètre apparent est de plus en plus petit et qui décroît en raison directe du carré de cette même distance, il y a compensation exacte, et l'éclat reste le même dans chacun des points de la source. Voilà pourquoi la lumière des planètes, telles que Vénus, Mars, Jupiter, nous semble toujours aussi vive, quand nous les voyons à une même hauteur au-dessus de l'horizon, si la pureté de l'atmosphère est d'ailleurs la même, bien que leurs distances à la Terre soient très variables. Le Soleil est vu des différentes planètes, de Mercure à Neptune, sous la forme d'un disque dont la surface apparente varie de 1 à 7000 environ : la quantité de lumière que reçoit chacun de ces corps

varie donc dans la même proportion; mais l'éclat intrinsèque du disque est le même dans Mercure que dans Neptune, à supposer que les espaces célestes n'absorbent point la lumière, et que, dans son passage à travers les atmosphères des deux planètes, celle-ci subisse le même degré d'extinction[1].

Tout le monde sait que si l'on regarde dans l'obscurité un boulet rouge, la forme sphérique n'est nullement sensible à l'œil : on croit voir un disque plat dont toutes les parties offrent la même intensité lumineuse. Si, au lieu d'un boulet sphérique, c'est une barre de fer ou d'argent polie et de forme prismatique qu'on a chauffée au rouge incandescent, un phénomène analogue se présentera. Quelle que soit la position de cette barre, ses arêtes ne seront pas visibles, l'éclat sera le même partout, sur les faces qui se présentent perpendiculairement à l'œil comme sur celles qui sont plus ou moins inclinées : en un mot, l'observateur croira voir une lame entièrement plane. Fait-on tourner la barre sur elle-même, on ne reconnaîtra le mouvement qu'à la variation apparente de largeur du ruban lumineux. Que faut-il conclure de ces expériences? C'est que la quantité de lumière émise par un corps solide incandescent dans une direction déterminée dépend de l'inclinaison de sa surface sur la direction des rayons lumineux. En effet, si deux éléments égaux pris l'un sur le côté de la barre métallique qui fait face à l'œil de l'observateur, l'autre sur une face inclinée, émettaient dans cette direction la même quantité de lumière, il est de toute évidence que c'est la face inclinée qui paraîtrait avoir l'éclat le plus considérable, puisque le même nombre de rayons se trouveraient répartis dans une aire dont la grandeur apparente serait moindre. Le Soleil est une sphère lumineuse; mais l'aspect qu'il présente est celui d'un disque plat, dont l'éclat intrinsèque n'est pas plus grand sur les bords qu'au centre[2] : ce qui confirme la loi que nous venons d'énon-

1. Il serait préférable de dire que cet éclat intrinsèque est le même à la limite extérieure de l'atmosphère de chaque planète.

2. Il est même aujourd'hui prouvé que ce sont les parties centrales du disque solaire qui

cer, qui se nomme aussi la *loi des cosinus*, parce que la quantité de lumière émise par des éléments égaux de la surface d'une source varie comme les *cosinus* des angles que font les rayons avec la normale à la surface.

§ 2. PROCÉDÉS PHOTOMÉTRIQUES.

Tels sont les principes sur lesquels on s'appuie pour évaluer soit le pouvoir éclairant, soit l'éclat intrinsèque des sources de lumière. Avant de décrire les appareils qui servent à la mesure de ces intensités, et qu'on nomme des *photomètres*, il importe de dire quelle est l'*unité lumineuse* généralement adoptée. Le choix de cette unité n'est pas aussi aisé qu'on pourrait le croire, du moins si l'on exige qu'elle remplisse rigoureusement la condition essentielle de *rester toujours identique à elle-même*. Comme le dit avec raison M. E. Becquerel, cette question, qui a beaucoup occupé les physiciens, n'est pas encore aujourd'hui résolue. Bouguer, dans ses expériences photométriques, prenait pour unité de pouvoir éclairant la lumière d'une chandelle ou d'une bougie. Mais l'intensité d'une telle lumière dépend de la pureté de la matière qui la forme, de ses dimensions et de celles de la mèche[1]. En spécifiant la composition et le poids de la matière brûlée, par exemple en prenant pour unité la lumière d'une bougie *stéarique* brûlant *dix grammes en une heure*, on réalise à peu près la condition d'identité dont nous parlions plus haut. Aujourd'hui, dans les expériences photométriques, on est convenu de prendre pour unité la lumière d'une lampe Carcel, brûlant par heure 42 grammes

sont les plus lumineuses, contrairement à ce qui devrait être s'il y avait égalité dans l'émission de la lumière sur toute la surface. Les astronomes en ont conclu que l'astre est entouré d'une atmosphère absorbante.

1. D'après Rumford, l'intensité de la lumière d'une chandelle bien mouchée étant représentée par 100, se réduit à 39 au bout de 11 minutes; après 19 minutes, elle n'est plus que 23, et se réduit à 16 quand on la laisse brûler jusqu'à 29 minutes sans toucher à la mèche.

d'huile de colza épurée : la mèche d'une telle lampe a 3 centimètres de diamètre. Des expériences comparatives ont prouvé que le pouvoir éclairant de cette lumière équivaut à 8 ou 9 fois celui de la bougie stéarique brûlant 10 grammes.

Le photomètre de Rumford est représenté dans la figure 211. Il est basé sur ce fait que, si les ombres portées sur le même écran par un corps opaque qu'éclairent deux lumières différentes, ont la même intensité, les pouvoirs éclairants de ces deux lumières sont égaux, quand elles sont à la même distance de l'écran, ou sont en raison inverse des carrés de ces distances, quand elles en sont inégalement éloignées.

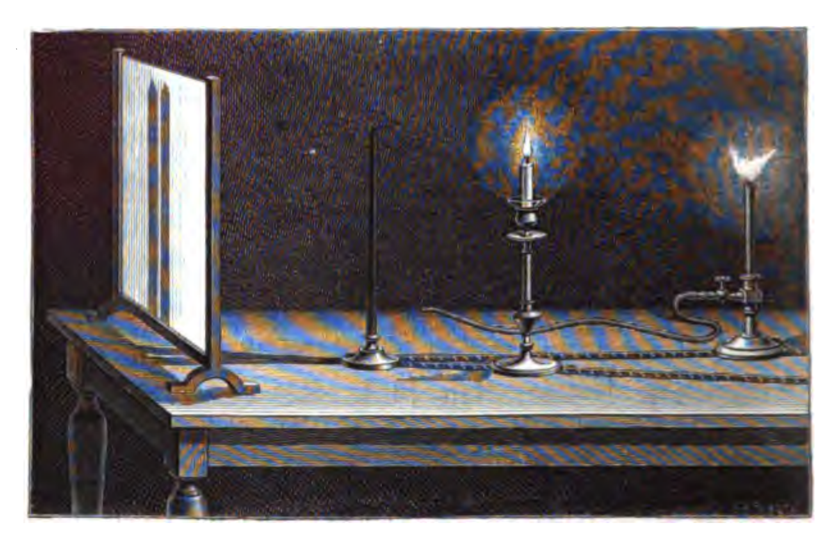


Fig. 211. — Photomètre de Rumford.

Supposons qu'on veuille comparer les pouvoirs éclairants d'un bec de gaz et d'une bougie ordinaire. Devant un écran de papier blanc, on placera verticalement un bâton noir cylindrique; et l'on disposera les deux lumières de façon que les ombres du bâton viennent se projeter toutes deux sur le papier, à peu près au contact. On éloigne alors progressivement celle des lumières qui donne l'ombre la plus intense, jusqu'à ce que l'œil ne puisse plus distinguer de différence entre les intensités des ombres. Pour juger mieux de l'égalité des ombres, on regarde l'écran par la face opposée à celle qu'éclaire directement

la bougie et la flamme du bec de gaz. A ce moment, les parties lumineuses de l'écran reçoivent les rayons des deux lumières à la fois, tandis que chaque ombre n'est éclairée que par une d'elles : l'égalité de leurs teintes indique donc l'égalité des illuminations de l'écran par chaque source isolée. Les pouvoirs éclairants des sources sont donc alors en raison inverse des carrés de leurs distances à l'écran.

Le photomètre de Ritchie (fig. 212) consiste en un tuyau noirci intérieurement, renfermant en son milieu deux miroirs

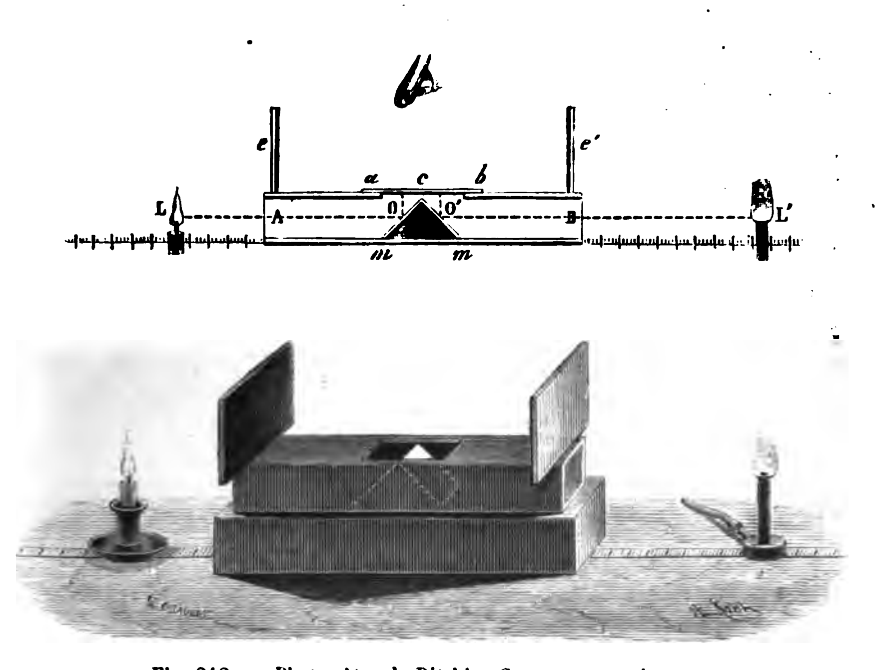


Fig. 212. — Photomètre de Ritchie. Coupe; vue extérieure.

mm' inclinés à 45°, mais en sens inverse. La face supérieure du tuyau est percée, en regard des miroirs, d'une ouverture qu'on bouche à l'aide d'une lame mince translucide *acb*, par exemple avec une feuille de papier huilé. Les deux lumières à comparer sont disposées latéralement de manière à envoyer chacune un faisceau lumineux sur le miroir correspondant. La réflexion renvoie verticalement ces faisceaux, l'un sur la moitié *ac*, l'autre sur la moitié *bc* de la lame, et l'on éloigne alors la lumière la plus vive, jusqu'à ce que l'œil juge que les deux

moitiés sont également éclairées. En prenant le rapport inverse des carrés des distances LO, L'O', on a celui des pouvoirs éclairants des deux lumières. On remplace quelquefois les miroirs par deux feuilles de carton blanc, et alors on supprime la lame translucide qui ferme l'ouverture *ab*.

Si l'on fait, au milieu d'une feuille de papier blanc, une tache avec une goutte de cire ou d'acide stéarique, et qu'on tende cette feuille sur un cadre, on a le photomètre très simple



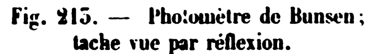


Fig. 213. — Photomètre de Bunsen; tache vue par réflexion.



Fig. 214. — Tache vue par transparence.

de M. Bunsen. Quand on éclaire l'une des faces du cadre, cette face vue directement par réflexion (fig. 213) montre une tache sombre sur un fond lumineux; vue de l'autre côté par transmission (fig. 214), la feuille présente une tache claire sur un fond sombre. Si deux lumières inégalement intenses éclairent à la fois les deux faces du cadre, la tache paraîtra sombre du côté de la source la plus lumineuse, et claire du côté de la plus faible. Enfin, si les lumières sont d'égale intensité ou si la plus forte est éloignée à une distance qui compense cette inégalité, la tache disparaîtra : la feuille de papier paraîtra unifor-

mément éclairée. On peut avec deux miroirs également inclinés de chaque côté du cadre juger simultanément de la disparition de la tache sur les deux côtés de la feuille.

Le photomètre de Bouguer (fig. 216) est fondé sur l'égalité d'éclat de deux portions d'une même surface éclairées séparément par chacune des sources. Un écran opaque empêche la lumière de chaque source d'atteindre la partie de surface éclairée par l'autre. Quant à cette surface, c'est un morceau de papier huilé, de verre dépoli. Léon Foucault employait de préférence une lame de porcelaine très homogène et assez mince

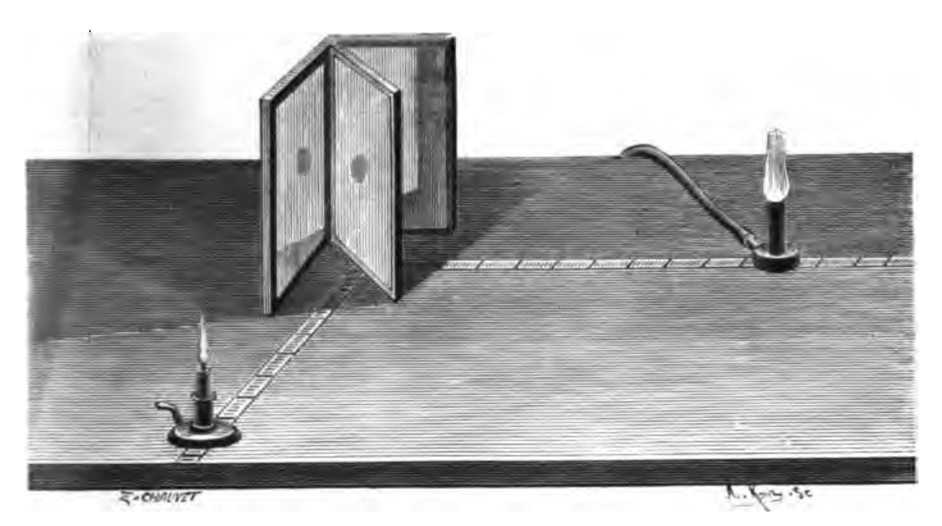


Fig. 215. — Photomètre de Bunsen en expérience.

pour être translucide. Les deux portions éclairées isolément ne sont séparées que par une étroite ligne d'ombre projetée par l'écran, ou (fig. 217) par une ligne lumineuse marquant l'espace éclairé à la fois par les deux sources. Dans les deux cas, l'œil placé derrière juge aisément du moment où il y a égalité d'éclat. Cette égalité obtenue, les intensités des lumières se déduisent de leurs distances à la lame de porcelaine.

Nous nous bornerons à la description de ces genres de photomètres, qui peuvent servir les uns et les autres à vérifier la loi du carré des distances. Cette vérification est très simple : il suffit de mettre d'une part une seule bougie : on trouve alors

qu'il en faut placer 4 à une distance double, 9 à une distance triple, etc., pour obtenir, soit l'égalité des ombres sur l'écran, soit celle des parties éclairées de la lame de porcelaine[1].

Si l'on emploie deux lumières égales, deux bougies, et qu'on place l'une d'elles 8 fois plus loin de l'écran que l'autre, on trouve que l'ombre portée par la première disparaît. A cette distance, l'intensité de sa lumière est 64 fois moindre que l'autre. Bouguer, à qui l'on doit cette expérience, en conclut

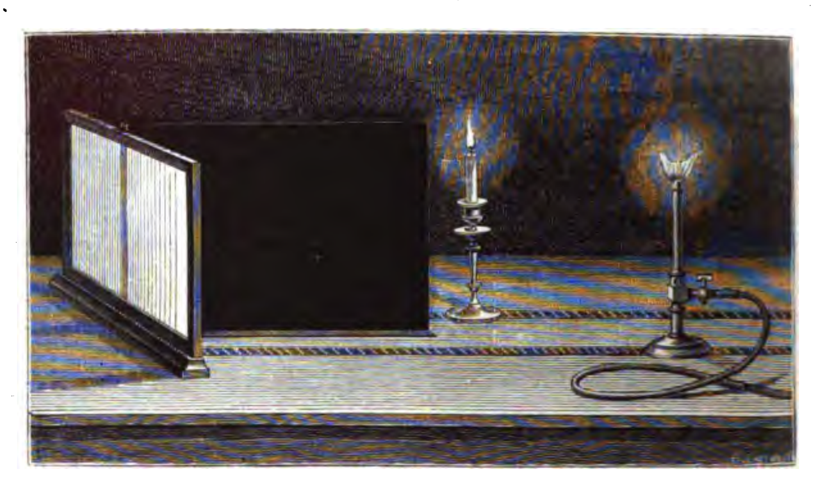


Fig. 216. — Photomètre de Bouguer.

qu'une lumière d'une intensité quelconque n'est pas sensible à notre œil en présence d'une lumière 64 fois plus vive. Cela

1. Nous devons au moins mentionner ici les expériences que François Arago a instituées d'après une méthode photométrique et à l'aide d'un appareil de son invention. L'illustre secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences basa sa méthode sur la loi formulée par Malus et qui règle l'intensité des images fournies par un faisceau de lumière polarisée, quand on change, entre 0° et 90°, l'angle des sections principales des cristaux biréfringents, polariseur et analyseur. Ces intensités varient comme les carrés des cosinus de l'angle : on dit par abréviation *la loi des cosinus carrés*. Arago commença par vérifier expérimentalement l'exactitude de cette loi, et pour y arriver il compara, à l'aide de son photomètre, la lumière réfléchie par une lame à faces parallèles à la lumière transmise par la même lame pour de mêmes incidences. Il constata que, lorsqu'un faisceau de lumière est en partie réfléchi, en partie transmis par une substance transparente, il n'y a pas, dans cette double opération, de perte de lumière. Il constata de même qu'il ne s'éteint pas de lumière dans la réflexion totale, ainsi que l'avait cru et affirmé Bouguer. Dès qu'Arago eut montré l'exactitude de la loi de Malus, il s'en servit pour l'étude de diverses questions de photométrie astronomique, par exemple pour comparer l'intensité lumineuse des bords du disque solaire à celle du centre, pour mesurer les intensités des lumières stellaires, etc.

explique comment les étoiles sont invisibles en plein jour, pourquoi de l'intérieur d'une chambre très éclairée nous ne voyons rien la nuit au dehors par les fenêtres, pourquoi encore on distingue à peine, du dehors par un beau soleil ce qui se passe à l'intérieur d'un appartement.

L'expérience de Bouguer n'était pas complète. En effet, si la quantité de lumière égale à un 64ᵉ devient insensible dans le cas de l'immobilité, il n'en est plus de même quand l'une des lumières est en mouvement par rapport à l'autre. C'est ce que

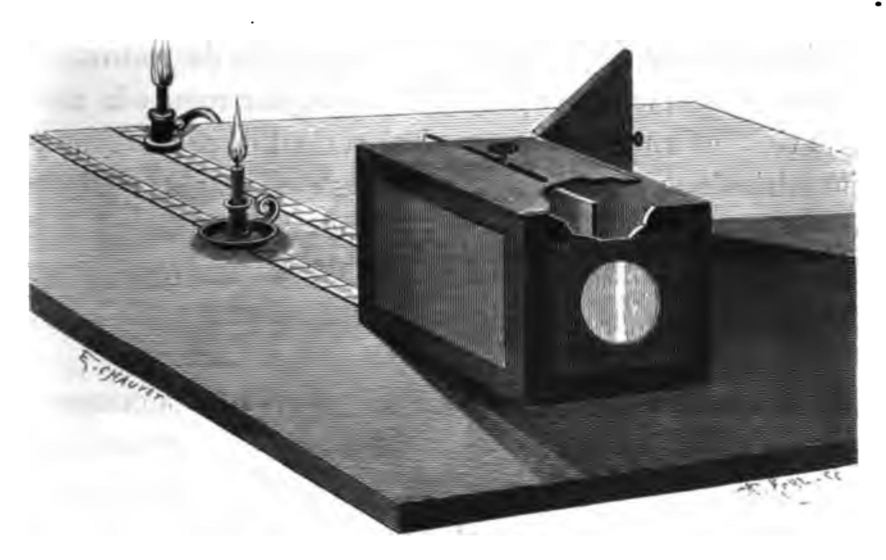


Fig. 217. — Photomètre de Léon Foucault.

chacun peut vérifier aisément par une observation familière semblable à celle qu'Arago raconte en ces termes : « Je me promenais, dit-il, au milieu de la journée, en marchant du nord au midi, sur la terrasse méridionale de l'Observatoire. Toute la partie des dalles au midi de mon corps était donc éclairée en plein par la lumière directe du Soleil ; mais les rayons de l'astre étaient réfléchis par les carreaux de vitre des fenêtres de l'établissement placées derrière moi ; il y avait donc là une image secondaire, une sorte de soleil artificiel situé au nord, dont les rayons, venant à ma rencontre, devaient former une ombre dirigée du nord au midi. Cette ombre était naturel-

lement très faible; en effet, elle était éclairée par la lumière directe du Soleil. Son existence ne pouvait donc être constatée que par la comparaison de cette lumière directe et de la lumière située à côté, composée de cette même lumière directe et des rayons très affaiblis réfléchis par les carreaux. Or, le corps restait-il immobile, on ne voyait aucune trace de l'ombre; faisait-on un geste avec les bras, un mouvement brusque du corps donnait-il lieu à un déplacement sensible de l'ombre, aussitôt on apercevait l'image des bras ou du corps. »

Dans les lunettes douées d'un fort pouvoir amplificatif, on voit les étoiles se déplacer rapidement en vertu du mouvement diurne. L'observation se fait d'ailleurs le jour comme la nuit; cette visibilité en plein jour provient surtout de ce que l'intensité intrinsèque du point lumineux reste constante, quel que soit le grossissement, tandis que le champ sur lequel il se projette, s'obscurcit par le fait de l'amplification. Arago pensait que la mobilité de l'étoile dans le champ devait contribuer à cette visibilité; Bessel n'admettait pas cette influence.

Bouguer et Wollaston ont cherché l'un et l'autre à comparer la lumière du Soleil à celle de la pleine Lune, en prenant pour terme de comparaison la lumière d'une bougie. Tous deux ont trouvé que la lumière du Soleil équivaut aux lumières réunies d'environ 5600 chandelles placées à la distance de 30 centimètres. Quant à la lumière de la pleine Lune, Wollaston l'a trouvée égale à la 144e partie de celle d'une chandelle placée à la distance de 3^{m},65. D'où il a conclu par un calcul facile que la lumière du Soleil vaut environ 800 000 fois celle de la pleine Lune. Bouguer ne trouvait que le nombre 300 000. En citant le nombre obtenu par Wollaston, nombre qui diffère tant de celui du physicien français, Arago ajoute : « Je ne saurais dire à quoi tient l'énormité de ce nombre comparé à la détermination de Bouguer, car la méthode employée était exacte et l'observateur d'une habileté incontestable. » Que conclure de là, sinon que le problème est à reprendre?

CHAPITRE XVII

L'ŒIL ET LA VISION

§ 1. DESCRIPTION DE L'ORGANE DE LA VISION CHEZ L'HOMME.

Les phénomènes si nombreux, si variés, que nous venons de décrire, se rapportent tous à la propagation de la lumière dans des milieux différents, et aux modifications qu'elle subit, soit au point de vue de son intensité, soit au point de vue de la couleur, quand on change les conditions de la route suivie par les rayons lumineux. Nous ne nous sommes pas préoccupé jusqu'ici de la manière dont nos organes se trouvent affectés par tous ces phénomènes, ni de la marche que la lumière suit quand elle cesse pour ainsi dire d'appartenir au monde extérieur pour devenir un phénomène interne.

Comment s'effectue ce passage, par quelle transformation un mouvement vibratoire, tel que celui des ondes de l'éther, arrive-t-il à produire chez l'homme et les autres animaux la sensation de la vue? Comment des variations dans la vitesse ou dans l'amplitude des vibrations produisent-elles des variations correspondantes dans l'intensité de la lumière et dans les couleurs des corps? Voilà une série de questions que la science est loin d'avoir toutes résolues, et qui d'ailleurs sont plutôt du ressort de la physiologie que de la physique.

Ce que l'on sait, ce que l'observation a permis d'étudier d'une façon positive, c'est la marche des rayons lumineux dans l'œil, depuis l'instant où ils pénètrent dans l'organe, jusqu'au mo-

ment où, atteignant les nerfs, l'impression qu'ils y produisent se transmet au cerveau et y détermine la sensation de la vue. Pendant ce trajet, les rayons lumineux obéissent, comme nous allons le voir, aux lois connues de la propagation de la lumière dans des milieux de forme et de densité variables : il ne s'agit que de phénomènes de réfraction simple.

L'œil n'est autre chose qu'une chambre noire dont l'ouverture est munie en avant d'une fenêtre transparente, en arrière d'une lentille, et dont le fond est tapissé par une membrane qui sert d'écran où viennent se peindre, renversés, les objets extérieurs. Décrivons avec quelques détails cet admirable instrument.

L'œil est, comme on sait, logé dans une cavité du crâne qu'on nomme l'*orbite :* sa forme est celle d'un globe à peu près sphérique, enveloppé de toutes parts d'une membrane dure, consistante, que sa ressemblance avec la corne a fait nommer *cornée*. La cornée se divise en deux segments d'inégale étendue; le plus petit, A, placé en avant de l'œil, a une courbure notablement plus prononcée que celle du segment postérieur ; c'est comme un verre de montre bombé faisant corps avec le bulbe de l'œil. De plus, il est d'une parfaite transparence et incolore, tandis que l'autre segment H est opaque, et sa couleur est d'un blanc légèrement bleuâtre. On les distingue par les noms de *cornée transparente* et de *cornée opaque;* celle-ci, constituant ce qu'on nomme vulgairement le *blanc de l'œil*, n'est pas transparente, mais seulement translucide pour les lumières d'une grande intensité.

Au travers de la cornée transparente, on aperçoit une membrane circulaire, dont la couleur varie selon les personnes ou les races, tantôt grise, tantôt bleu clair ou foncé, tantôt d'un brun jaunâtre. Cette membrane D est l'*iris*, sorte de diaphragme percé à son centre d'une ouverture également circulaire, du moins chez l'homme, ouverture qu'on nomme la *pupille*. Derrière la pupille, qui est l'ouverture de la chambre noire par laquelle la lumière extérieure pénètre dans l'œil, se

trouve une lentille solide E : c'est le *cristallin*, dont la face antérieure offre une courbure moins prononcée que la surface interne. Le cristallin divise la cavité de l'œil en deux parties ou chambres de dimensions très inégales, ainsi qu'on peut le voir dans la figure 218. La chambre antérieure B, comprise entre la cornée transparente et le cristallin, est pleine d'un liquide peu différent de l'eau pure et qui a, à peu près, le même pouvoir réfringent ; on nomme ce liquide l'*humeur*

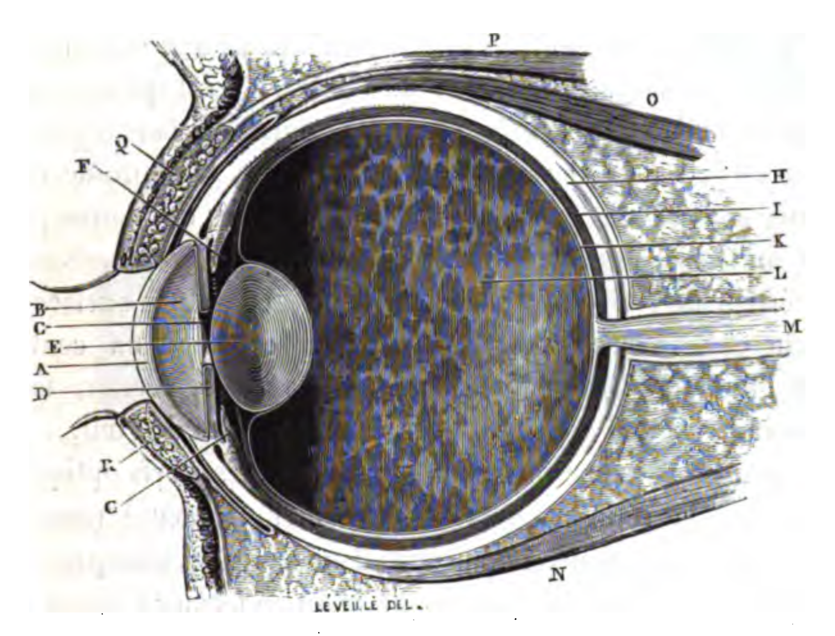


Fig. 218. — Coupe diamétrale antéro-postérieure de l'œil humain.

aqueuse. Entre le cristallin et le fond de l'œil, se trouve la chambre postérieure, toute remplie d'une substance transparente, incolore, ayant la consistance d'une gelée et un peu plus réfringente que l'eau ; c'est l'*humeur vitrée* L.

Un faisceau de lumière qui pénètre dans l'œil traverse donc la série de milieux réfringents que voici, avant d'arriver au fond de l'organe : la cornée transparente, l'humeur aqueuse, le cristallin et l'humeur vitrée. Dans chacun de ces milieux, il subit une réfraction particulière, et l'ensemble de ses déviations est tel, qu'il va former son foyer sur la membrane même

qui tapisse la chambre postérieure de l'œil. C'est le moment de dire que toute la surface interne de la cornée opaque ou de la *sclérotique*, comme on dit en termes d'anatomie, est recouverte d'une membrane mince, la *choroïde* I, dont la face concave est tapissée d'un pigment noir propre à absorber la lumière[1].

Toutes les parties de l'œil que nous venons de décrire sont celles qui concourent à la formation des images des objets; leurs fonctions sont pour ainsi dire passives. C'est à l'endroit même où se produisent ces images, qu'a lieu l'impression de la lumière sur la partie sensible de l'œil, et voici quelle est la disposition de cette partie qui joue le premier rôle dans le phénomène de la vision. Derrière le globe de l'œil, la choroïde et la cornée opaque sont percées d'un trou circulaire qui donne passage au faisceau des nerfs optiques. Ce faisceau M, en arrivant à l'intérieur de l'œil, s'épanouit et s'étend sur toute la surface de la choroïde, formant une membrane directement en contact avec l'humeur vitrée; c'est la *rétine* K, qui est l'écran, mais un écran vivant et sensible, de la chambre noire de l'œil.

A peu de distance du point d'insertion des nerfs optiques, existe sur la rétine une tache de couleur jaunâtre (*macula lutea*) qui a une grande importance dans la vision, puisque c'est toujours sur cette *tache jaune* que vient se former l'image du point sur lequel nous fixons la vue : c'est le lieu de la vision la plus distincte. L'œil de l'homme et celui du singe sont les seuls dont la rétine possède la tache jaune. Les parties avoisinantes de la rétine sont douées d'une moindre sensibilité et surtout ne jouissent pas, au même degré que la tache jaune, de la faculté de distinguer deux impressions produites en des points très voisins. Il existe en outre un point où cette sensibilité est entièrement nulle : toute la partie du fond de l'œil qui

1. C'est ce même pigment qui enduit l'iris, et dont l'épaisseur plus ou moins grande détermine la couleur plus ou moins foncée des yeux. Les yeux *bleus* ou *gris clair* sont ceux où la couche du pigment est très mince; la pigmentation plus abondante donne lieu à une couleur de plus en plus foncée, et son absence produit la particularité qui fait désigner les individus ainsi conformés sous le nom d'*albinos*.

correspond à l'entrée du nerf optique est en effet insensible à la lumière. C'est ce qu'on nomme la *tache aveugle* ou le *punctum cæcum*. On constate par des expériences très simples l'existence de cette région d'insensibilité de la rétine.

L'une d'elles est due au physicien français Mariotte. Elle consiste à marquer sur un plan vertical, sur un mur par exemple, une série de points tracés à égale distance les uns des autres. Si l'observateur se place en face de la ligne de points, et fixe l'un d'eux avec l'œil droit en fermant l'œil gauche, il voit le point fixé nettement et aussi la série des autres, mais d'une manière confuse.

S'éloignant alors du mur, sans cesser de regarder le premier point, il arrive un moment où le second devient invisible, puis



Fig. 219. — Expérience permettant de constater l'insensibilité du *punctum cæcum*.

à une distance un peu plus grande il reparaît. C'est ensuite le tour du troisième, puis du quatrième point de disparaître, et il en est successivement de même de toute la série. La disparition de chaque point s'effectue toujours au moment où la distance de l'œil au mur est à peu près triple (pour certaines vues quadruple) de celle qui sépare le point qui disparaît du premier de la série, de celui que fixe l'œil droit. En opérant avec l'œil gauche il faudrait fixer le dernier point vers la droite.

L'expérience de Mariotte se fait encore de la manière suivante, en se bornant à tracer deux points ou deux cercles.

Sur un fond noir, on place deux petits cercles blancs, ou un cercle blanc et une petite croix blanche, comme le marque la figure 219. On ferme l'un des yeux, le gauche par exemple, et avec l'œil droit qu'on place en regard de la croix, on fixe celle-ci attentivement. Puis on s'éloigne ou l'on s'approche jusqu'à

ce que la distance de l'œil ouvert à la croix soit un peu plus de quatre fois supérieure à l'intervalle de celle-ci au cercle blanc. A ce moment, le cercle blanc disparaît, le fond noir paraît continu. Il faut avoir soin, pour que l'expérience réussisse, de maintenir bien fixe l'œil qui regarde la croix blanche[1].

Il est facile de se rendre compte de la marche des rayons de lumière qui émanent d'un objet AB, et de la façon dont cet objet va faire son image sur la rétine. Le système lenticulaire, composé de la cornée transparente et du cristallin séparés par l'humeur aqueuse, a pour centre optique un point O, situé un peu en arrière du cristallin (fig. 220). Si l'on mène les axes secondaires AO, BO, c'est sur leur prolongement, et au point où ils rencontrent la rétine, que convergent les faisceaux émanés des points A et B; les points intermédiaires formeront leurs images entre les points *a* et *b*. L'image *ba* de l'objet sera donc renversée. Ce résultat est une des conséquences des lois de la réfraction et de la marche des rayons dans les lentilles; mais on a pu le constater directement par l'observation. Ainsi, en prenant l'œil d'un animal qui vient de mourir, et en le débarrassant extérieurement des couches de graisse dont le bulbe est enveloppé, on peut amincir la cornée opaque, à sa partie postérieure, de façon à la rendre translucide. L'œil ainsi préparé et exposé à la lumière du jour



Fig. 220. — Formation des images dans un œil normal.

1. Helmholtz décrit ainsi un procédé qui permet à chacun de déterminer facilement la forme et les dimensions apparentes du *punctum cæcum* : « On donne à l'œil, dit-il, une position fixe, à 8 ou 12 pouces au-dessus d'une feuille de papier blanc sur laquelle on a marqué une petite croix servant de point de fixation. Puis on promène sur le papier, dans la projection du punctum cæcum, la pointe, trempée dans l'encre, d'une plume blanche ou du moins peu foncée : la pointe noire disparait; éloignant la plume successivement, selon différentes directions, on marque à chaque fois le point où elle commence à devenir visible..... Pour désigner la grandeur apparente que la tache aveugle occupe dans le champ visuel, nous dirons que onze pleines lunes pourraient s'y ranger à la file sans dépasser son diamètre, et qu'à une distance de 6 à 7 pieds, une figure humaine peut y disparaître en entier. » (*Optique physiologique*.)

laisse voir par transparence l'image très petite et très nette des objets extérieurs. On peut aussi voir l'image renversée d'une bougie à travers la cornée des animaux albinos, cornée que l'absence de pigmentum colorant rend naturellement translucide.

Nous avons dit que l'iris joue le rôle d'un diaphragme qui ne laisse pénétrer dans l'œil que les cônes de lumière ayant pour base l'ouverture de la pupille. Mais l'iris peut se contracter ou se dilater spontanément, de manière à rétrécir ou au contraire à agrandir la pupille. Ce mouvement automatique se produit dans le premier sens, quand l'éclat de la lumière reçue par l'œil augmente; il se fait en sens contraire, si cet éclat diminue. Même chose arrive quand l'œil regarde des objets situés à des distances différentes : la pupille s'élargit pour les objets éloignés et se rétrécit pour les objets rapprochés de l'œil. Regardez votre œil même dans un miroir que vous tenez à la main à une certaine distance, et examinez les dimensions de votre pupille; puis, rapprochez rapidement le miroir sans cesser de fixer la pupille, vous verrez celle-ci se rétrécir lentement.

L'œil étant assimilé à un système de lentilles, il peut paraître singulier qu'il serve à voir nettement tant d'objets situés à des distances si différentes. Il n'est pas douteux que, pour que la vision soit distincte, l'objet doive faire son image nette sur la rétine même. Il faut donc, quand la distance change, que le foyer puisse changer aussi, de manière à coïncider toujours avec la surface de la membrane nerveuse. En effet, si l'image nette d'un point lumineux se fait, soit en avant, soit en arrière de la rétine, il arrive ce qu'on observe à l'aide d'une lentille convergente quand on reçoit l'image en avant ou en arrière du foyer correspondant; au lieu d'un point net, on aperçoit un cercle diffus. Il résulte de là que « nous ne pouvons pas voir distinctement en même temps des objets situés à différentes distances de l'œil ». Pour se convaincre de ce fait, dit Helmholtz, qu'on tienne à environ six pouces de l'œil un voile ou tout autre tissu transparent; et plus loin, à une distance d'environ deux

pieds, qu'on mette un livre. En fermant un œil pour simplifier l'expérience, on s'assure aisément qu'on est maître de regarder à volonté tantôt les fils du voile, tantôt les lettres du livre, et de les voir nettement, mais que les lettres deviennent confuses lorsqu'on regarde les fils du voile, et que, pendant qu'on regarde les lettres, le voile n'apparaît plus que comme un obscurcissement léger et uniforme du champ visuel. Si, sans changer la direction de l'œil, on examine tantôt l'objet rapproché, tantôt l'objet éloigné, on remarque qu'à chacune de ces alternatives, l'œil fait un effort pour opérer le changement. » (*Optique physiologique.*) C'est ce fait qu'on exprime en disant que l'œil s'accommode aux distances. Mais à l'aide de quel mécanisme l'œil conserve-t-il de cette façon sa propriété de distinguer nettement les objets? Comment, en un mot, se fait l'*accommodation?* Pour les petites distances le rétrécissement de la pupille, pour les grandes un changement dans la forme du cristallin qui diminue son pouvoir convergent, tels sont les deux mouvements soumis à notre volonté, mais aussi se faisant sans que nous en ayons conscience, à l'aide desquels les physiciens expliquent l'adaptation dont il s'agit.

Il y a une limite inférieure à la distance des objets que nous cherchons à voir nettement : c'est la limite de la *vision distincte* ou encore le *punctum proximum*, qui varie selon les âges, entre 15 à 20 centimètres. Le point le plus éloigné (*punctum remotum* ou mieux *remotissimum*) auquel puisse se faire l'accommodation est à l'infini pour certains yeux; pour d'autres, il n'en est pas ainsi, et la vision des objets éloignés ne peut avoir lieu pour eux que par le secours de lunettes.

Quand les muscles de l'œil sont à l'état de repos, ou, si l'on veut, lorsqu'il n'y a aucun effort d'accommodation, la vision distincte est celle qui correspond au *punctum remotum :* les yeux pour lesquels ce point est à l'infini sont les yeux *normaux* ou *emmétropes*[1].

1. ἔμμετρος, *dans la mesure*, et ὤψ, *œil.* Il s'agit ici seulement de la *vision distincte;* car un œil emmétrope peut avoir des défauts à d'autres points de vue.

Les yeux pour lesquels le *punctum remotum* n'est pas à une distance infinie, ne peuvent s'accommoder pour des objets dont la distance est plus grande que celle de ce point. On les dit *brachymétropes* ou *myopes*. Ils ne peuvent réunir sur la rétine que les faisceaux lumineux qui sont divergents à leur point d'incidence.

On donne encore le nom d'*hypermétropes* aux yeux dont la distance focale surpasse celle du cristallin à la rétine, de sorte qu'ils ne peuvent voir distinctement sans un effort fatigant d'accommodation les objets même les plus éloignés : la vision n'est nette pour eux à aucune distance.

Enfin la conformation de l'œil peut être telle, que la limite



Fig. 221. — Formation de l'image dans l'œil d'un presbyte.



Fig. 222. — Formation de l'image dans l'œil d'un myope.

inférieure de la vision distincte soit beaucoup plus grande que celle dont nous avons parler plus haut. Cette affection, qui se rencontre surtout chez les vieillards, les oblige à tenir un livre très éloigné pour pouvoir lire sans confusion. Cela tient à ce que l'image va se former au delà de la rétine (fig. 221), de sorte que, la convergence des rayons émanés d'un point lumineux n'ayant pas lieu sur cette membrane, il y a impression confuse. En éloignant l'objet, le foyer se rapproche et la vision devient distincte. Les personnes affectées de ce défaut de la vue sont les *presbytes*. On attribue le presbytisme soit à la diminution du cristallin, soit à une rigidité qui ne lui permet pas de s'adapter aux petites distances, soit enfin à un aplatissement du globe de l'œil, d'avant en arrière.

Les *myopes* ont un défaut opposé. La distance de la vision

distincte est beaucoup plus courte pour eux que pour les vues normales ; et à de grandes distances, la vision est toujours confuse. Cela vient de ce que, pour des raisons opposées à celles qui produisent le presbytisme, le foyer ou l'image d'un point lumineux se forme en avant de la rétine (fig. 222). La trop grande convexité du cristallin, l'allongement du globe de l'œil sont les causes les plus ordinaires de la myopie. C'est un défaut qui s'acquiert par l'habitude : les personnes que leurs occupations obligent à regarder de près de petits objets, comme les gens de lettres et de bureau, sont fréquemment atteintes de cette infirmité de la vue.

L'œil n'est pas achromatique, comme on l'avait cru d'abord; mais la dispersion qui se produit dans ses divers milieux est presque insensible.

Nombre de physiciens se sont demandé pourquoi, les images des objets étant renversées sur la rétine, nous voyons ceux-ci dans leurs positions réelles, c'est-à-dire droits. Pour expliquer cette singularité apparente, on a fait des hypothèses plus ou moins ingénieuses, mais qui, selon nous, n'ont pas de sens, attendu que la question elle-même ne signifie rien. D'abord, l'image peinte sur la rétine n'est pas pour nous un objet que nous examinons comme si nous possédions encore un œil derrière la rétine. A la vérité, les objets extérieurs et nous-même, notre propre corps, sont vus par nous dans leurs positions relatives exactes : c'est tout ce qu'il faut, et, quand nous disons que nous voyons un objet, un arbre par exemple, droit et non renversé, cela signifie simplement que sa tête et ses pieds nous semblent, la première, s'élever dans l'air, l'autre toucher au sol, absolument dans le même sens que notre propre tête et nos pieds dans notre position normale. Si, par une disposition particulière de notre œil, analogue à celle de certaines lunettes, les images se faisaient droites sur la rétine, il ne nous paraît pas douteux que notre perception n'en serait nullement changée : pour qu'il en fût autrement, il faudrait qu'il y eût exception pour l'image de notre corps, ce qui est hors de supposition.

§ 2. PERSISTANCE DE L'IMPRESSION LUMINEUSE.

L'impression de la lumière sur la rétine, la sensation qui en résulte ne cessent pas instantanément, aussitôt que la cause qui leur donne naissance cesse d'agir. En un mot, l'action de la lumière peut être excessivement courte ; mais la sensation persiste pendant un certain temps dont la durée dépend à la fois de l'intensité de la lumière et de l'état de fatigue de l'œil.

Les faits qui prouvent cette persistance sont d'une observation facile. Citons-en quelques-uns.

Quand on jette les yeux sur un objet très brillant, très lumineux, sur le Soleil par exemple, puis qu'on les ferme brusquement, ou, ce qui revient au même, qu'on les porte sur un fond sombre, on voit encore quelque temps l'image brillante du disque. Cette image *positive* s'affaiblit rapidement et disparaît pour faire place à d'autres images *accidentelles* dont plus loin nous dirons un mot. Il n'est pas nécessaire que l'objet qu'on fixe ait une lumière aussi intense. Ainsi, en regardant de l'intérieur d'une chambre la lumière diffuse du jour venant par une fenêtre, puis fermant brusquement les yeux, on voit persister nettement l'image des rectangles lumineux formés par les vitres, découpés par les lignes sombres de la croisée.

Cette persistance de l'impression lumineuse se constate aisément d'une autre manière. On n'a qu'à faire mouvoir rapidement un point brillant, l'extrémité d'une baguette embrasée, pour que l'œil voie, au lieu d'une suite de points lumineux isolés, un seul trait de feu continu. Ce trait se change en un cercle, en une courbe quelconque, si l'on fait tourner en cercle le bout de la baguette, ou si on lui fait décrire la courbe en question. Les traînées lumineuses des fusées dans les feux d'artifice, celles des étoiles filantes, sont dues en grande partie à la durée de l'impression de la lumière sur la rétine ; nous disons *en grande partie*, afin que l'on ne confonde pas le trait de feu

avec la traînée, quelquefois persistante et probablement matérielle, qu'on observe après la disparition de certains bolides. Le même phénomène s'obtient si, le point lumineux restant immobile, c'est un miroir reflétant son image qui reçoit le mouvement. Nous avons vu Lissajous combiner les réflexions sur deux miroirs à angle droit pour étudier les vibrations des deux diapasons, et pour comparer les hauteurs des sons que ces diapasons produisent. Les courbes optiques ainsi obtenues sont évidemment dues à la persistance des impressions lumineuses successives. Déjà Wheatstone, dans le *kaléidophone*, avait tiré parti de cette persistance pour étudier les mouvements vibratoires d'une verge, à l'extrémité de laquelle était fixée une petite perle de verre : le point lumineux formé par la réflexion de la lumière du jour ou de celle d'une lampe sur ce miroir sphérique se convertissait en courbes continues dont les sinuosités marquaient les variations de position ou l'oscillation de la tige. C'est encore la persistance des impressions lumineuses qui nous fait voir renflée en son milieu une corde vibrante, et nous empêche de distinguer les rais d'une roue en mouvement, dès que la rotation est devenue assez rapide pour que la sensation soit continue.

On peut définir les faits que nous venons de décrire sommairement, en disant, comme Helmholtz, que « des impressions lumineuses répétées avec une rapidité suffisante produisent le même effet sur l'œil qu'un éclairage continu ». Cela est vrai de la lumière considérée au point de vue non seulement de l'intensité, mais aussi de la couleur. L'expérience du disque rotatif telle que l'a faite Newton, et que nous l'avons rapportée au chapitre VII, page 162, montre clairement comment les sensations successives de couleurs différentes se superposent, ou mieux se mélangent, quand la succession est assez rapide, et produisent la sensation unique d'une couleur qui est la synthèse des couleurs composantes.

On a cherché à évaluer la durée de la persistance lumineuse. D'Arcy, au siècle dernier, Aimé, dans celui-ci, puis Plateau

ont fait, par des procédés divers, des séries d'expériences à ce sujet. Le premier de ces physiciens avait trouvé $0^s,13$ pour cette durée. La méthode d'Aimé consistait à faire tourner en sens contraire deux disques montés sur le même axe, dont l'un était percé sur son contour de plusieurs ouvertures étroites, équidistantes et égales, tandis que le second disque n'en avait qu'une. Tant que la rotation est lente, on ne voit à la fois qu'une fenêtre lumineuse, quand l'ouverture unique du second disque passe devant l'une des autres. Mais si le mouvement est assez rapide, on voit deux, trois, quatre ouvertures lumineuses à la fois. Cela arrive dès que la durée de l'impression dépasse le temps qui s'écoule entre deux, trois, quatre coïncidences des ouvertures. On a pu ainsi mesurer cette durée en constatant la vitesse de rotation, et étudier en outre diverses circonstances du phénomène.

C'est ainsi que Plateau a montré qu'il faut un certain temps à la lumière pour que la sensation soit complète et atteigne son maximum, et que ce maximum dure, avant de décroître, d'autant plus que l'impression est plus faible. En outre, la durée totale de l'impression va en croissant avec l'intensité de la lumière; elle est en moyenne de $0^s,84$.

En faisant tourner à la lumière du jour un disque de carton divisé en 24 secteurs alternativement blancs et noirs, ou encore blancs et colorés, Plateau a reconnu que la vitesse de rotation nécessaire pour obtenir sur le disque une teinte grise ou colorée uniforme dépend de l'intensité de la lumière, et dépend également de l'espèce de couleur qui recouvre les secteurs colorés. La teinte reste la même, si la proportion entre la surface des secteurs blancs et celle des secteurs noirs ou colorés reste constante. C'est ce qu'on démontre à l'aide du disque rotatif de la figure 223, où la surface du cercle est partagée en trois zones diversement divisées : la zone centrale, formée d'un demi-cercle blanc et d'un demi-cercle noir, donne le même gris que la zone suivante où la surface est divisée en quatre segments, et que l'anneau extérieur divisé en huit parties alter-

nativement blanches et noires. Seulement la vitesse de rotation nécessaire pour rendre chaque zone uniforme va en croissant du contour du disque au centre. Six révolutions par seconde suffisent pour qu'on obtienne l'uniformité de l'anneau externe; il en faut douze pour l'anneau intermédiaire et vingt-quatre pour le cercle central. Quand cette vitesse est suffisante pour ce dernier, tout le disque paraît uniformément teinté. Au contraire, comme Plateau l'a remarqué, si le nombre des secteurs reste le même, on peut changer le rapport de largeur des secteurs blancs et des secteurs noirs sans que la vitesse nécessaire pour l'uniformité change. On s'en assure avec un disque disposé comme le second cercle de la figure 223, où les secteurs blancs vont en s'élargissant du centre à la circonférence.




Fig. 223. — Disques rotatifs; expériences sur la persistance des impressions lumineuses.

Lorsqu'un corps se meut avec une certaine rapidité, l'œil ne peut en distinguer nettement ni la forme ni les détails. Il faudrait pour cela que l'axe optique pût se déplacer aussi vite que l'objet, afin que l'image de ce dernier vînt toujours se former aux mêmes points de la rétine. Comme cela est généralement impossible, c'est cette image même qui se déplace sur le fond rétinien, et comme la persistance de l'impression existe pour chacun des points où elle se forme, il y a superposition et dès lors confusion des différentes parties de l'objet. L'exemple le plus simple de cette confusion est celui des rais d'une roue en mouvement.

Mais quand la lumière qui éclaire et fait voir l'objet en mouvement, ne dure qu'un temps très court, lorsqu'elle le frappe

pour ainsi dire instantanément, de manière que le déplacement du corps pendant ce temps soit insensible, alors il ne se forme qu'une image, et la persistance de l'impression fait voir nettement le corps : il semble alors immobile, comme si on l'eût arrêté brusquement au moment précis où l'a frappé le rayon lumineux. C'est une circonstance qui se présente dans les orages nocturnes. La durée de l'éclair est alors si courte et en même temps sa lumière est si vive, que le paysage est vu avec une grande netteté, et qu'un objet en mouvement, un train de chemin de fer, par exemple, apparaît en repos, bien qu'il soit lancé à toute vapeur.

Un phénomène singulier, facile d'ailleurs à expliquer, est celui qui se produit lorsqu'on fait tourner sur le même axe, avec des vitesses égales mais de sens contraire, deux roues ayant un même nombre de rais : on aperçoit alors une roue immobile ayant un nombre de rais double. Cette apparence est due à la coïncidence des rais et à la superposition des impressions causées par chacune d'elles. Si l'on suppose qu'une des roues soient en repos, ces coïncidences seront à chaque tour en même nombre que les rais; elles seront évidemment deux fois plus nombreuses si les deux roues tournent ensemble en sens opposés. Mais s'il y avait une différence de vitesse, on verrait les lieux de coïncidence se déplacer : la roue semblerait tourner lentement.

Il nous reste à dire un mot des *images accidentelles*. Nous avons mentionné déjà celles qui se forment lorsque l'œil, après avoir observé un objet lumineux, est fermé brusquement ou se détourne sur un fond sombre : l'image est alors lumineuse comme l'objet, et pour cette raison on la nomme *positive*. Mais si l'on contemple fixement, pendant un temps suffisamment long, trente ou quarante secondes par exemple selon l'intensité de la lumière, un objet lumineux, une fenêtre par où pénètre la lumière du jour; si ensuite on porte les yeux sur un mur clair, sur le plafond, alors l'image accidentelle qui se forme est *négative* : la croisée apparaît comme une croix blanche se déta-

chant sur des carreaux sombres. Ces images accidentelles persistent quelquefois assez longtemps; elles se voient encore si l'on ferme les yeux. D'après certains physiologistes, elles sont dues à l'état de fatigue qu'ont subi les points de la rétine où la lumière a agi avec le plus de force; au contraire, les points où s'est faite l'image des parties sombres a subi une excitation moindre. Quand l'œil se porte ensuite sur une autre surface, la sensibilité est moindre dans les premiers points que dans les autres; la lumière y est moins vive, et il en résulte une image négative de l'objet primitivement contemplé. Cette explication est insuffisante, et celle qu'a donnée Plateau paraît plus satisfaisante et plus complète : selon lui, la rétine impressionnée ne vient pas instantanément à l'état de repos : elle oscille entre deux états opposés, entre deux impressions contraires qui font succéder le noir au blanc, et à une couleur quelconque ou complémentaire; mais en quoi consistent ces états opposés de la rétine, c'est une question qui ne nous semble pas résolue.

Les images accidentelles, tant positives que négatives, se déplacent avec l'axe optique, de sorte que leur situation apparente dans le champ visuel coïncide toujours avec le point de la rétine qui a reçu l'impression première, avec la tache jaune, si la vision a été directe et distincte.

Nous décrirons, dans la deuxième partie de la Lumière, quelques applications intéressantes du phénomène de la persistance des impressions lumineuses.

Quand on regarde à distance un corps très lumineux se détachant sur un fond sombre ou noir, l'image paraît empiéter sur le fond. On s'assure de ce fait par une expérience fort simple que voici. On dessine deux figures égales, deux carrés ou deux cercles par exemple (fig. 224), l'un noir sur fond blanc et l'autre blanc sur fond noir, et on les place l'un à côté de l'autre en les éclairant d'une vive lumière. Le cercle blanc paraîtra sensiblement plus grand que le cercle noir. Ce phénomène est ce qu'on nomme *irradiation*.

Il se manifeste sous des apparences très variées. Au devant de la flamme d'une bougie (fig. 225), interposons une règle noire qui coupe l'image de la flamme; on verra celle-ci déborder l'arête de la règle et former au dedans une échancrure lumineuse. Quand la Lune est entre la conjonction et le pre-

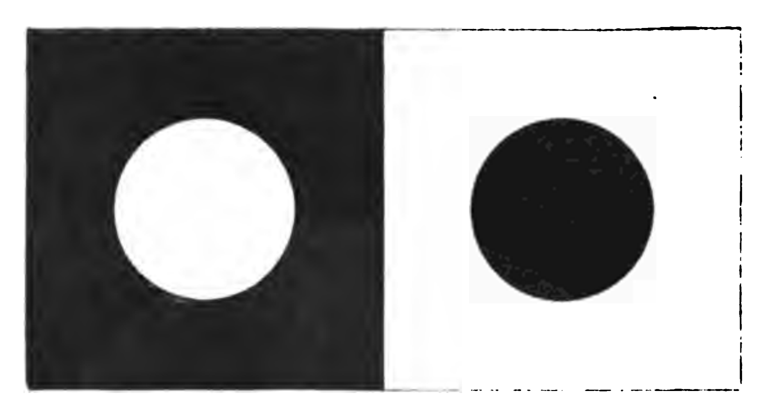


Fig. 224. — Phénomènes d'irradiation.

mier ou le dernier quartier, que sa partie lumineuse a la forme d'un croissant et que le reste du disque est visible par la lumière cendrée, il semble que les deux segments lunaires n'appartiennent pas au même cercle : le contour du croissant déborde l'autre. Pendant les éclipses totales de Soleil, au moment où le disque lunaire masque entièrement la lumière éblouissante de l'astre, on aperçoit des masses lumineuses rougeâtres connues des astronomes sous le nom de *protubérances;* elles reposent par leur base sur le contour sombre de la Lune, mais, comme le montre la figure 226, elles empiètent sur ce contour. L'effet est absolument pareil à celui de l'irradiation.



Fig. 225. — Irradiation. Échancrure apparente de l'arête d'une règle.

C'est encore le même phénomène qui fait paraître brisées les lignes de séparation d'un damier ou d'un assemblage de carrés,

de rectangles alternativement blancs ou noirs (fig. 227), et qui donne à un ensemble de cercles tangents comme ceux de la figure 232 l'apparence d'une série de figures hexagonales.

Mais quelle est la cause de l'irradiation? Les uns, comme



Fig. 226. — Les protubérances solaires pendant une éclipse totale de Soleil (éclipse du 22 décembre 1870).

M. Plateau, l'attribuent à une continuation de l'impression de la rétine au delà du contour d'une image intense. D'autres, comme M. Trouessart, admettent qu'il se forme des images



Fig. 227. — Effets d'irradiation.

multiples empiétant les unes sur les autres. L'une et l'autre de ces théories considèrent l'irradiation comme un phénomène subjectif dépendant de la sensibilité de la rétine, ou de certains accidents qui se trouvent dans les milieux de l'œil. Il y a une

difficulté toutefois : c'est que certains des phénomènes en question (comme l'irradiation des protubérances dans les éclipses) ont été obtenus objectivement et se voient sur les épreuves photographiques. Il faudrait donc admettre qu'il y a, dans les lunettes ou dans les plaques sensibles employées par les photographes une disposition ou propriété précisément analogue à celles qu'on suppose exister dans nos organes[1].

§ 3. ILLUSIONS D'OPTIQUE.

Il y a des circonstances où l'œil, même sain et normal, voit les objets autrement qu'ils ne sont en réalité; on donne le nom d'*illusions d'optique* aux fausses apparences que présentent alors les images.

Plusieurs des phénomènes décrits dans le paragraphe qui précède pourraient, d'après cette définition, être considérés comme des illusions d'optique. Les effets de la persistance lumineuse, les images accidentelles, l'irradiation, seraient dans ce cas. La difficulté est de distinguer nettement ce qui dépend de la sensation même et ce qui n'est qu'une affaire de jugement. Il peut arriver et il arrive en effet que certaines sensations visuelles ne correspondent point à des objets réels : par exemple une secousse, un coup sur le globe de l'œil produit une sensation de lumière, bien qu'aucun objet lumineux ne se trouve en présence. Dans d'autres cas, la sensation est bien déterminée par une impression extérieure, et l'image sur la rétine est bien telle qu'elle doit être pour un œil normalement

1. D'après M. Le Roux, le phénomène de l'irradiation serait « spécial au champ de la vision indistincte; il augmente à mesure qu'on s'éloigne de la *fovea centralis;* pour cette portion de la rétine, les phénomènes d'irradiation, tels que les décrivent les auteurs, n'existent pas; pour elle il n'y a d'autre irradiation que celle qui provient des limites de l'acuité de la vision; pour le champ de la vision indistincte, l'irradiation est encore une question d'acuité de vision; elle s'explique physiologiquement par l'espacement progressif des éléments sensibles de la rétine lorsqu'on s'éloigne de la *fovea centralis*, lieu de leur maximum de concentration. » (Voyez les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* pour 1873.)

conformé; cependant nous portons un jugement erroné, une appréciation fausse, dont il reste, en chaque cas, à rechercher la cause : ce qui n'est pas toujours facile.

Et d'abord, que doit-on entendre par ces mots : *voir les choses comme elles sont?*

Le sens de la vue, comme nos autres sens, exige une éducation préalable, qui se fait instinctivement pour la plupart d'entre nous, à une époque de la vie où nous sommes incapables de nous rendre compte des acquisitions successives, fruits d'une observation et d'une expérimentation pour ainsi dire inconscientes. Peu à peu cependant, sous le contrôle continu de nos autres sens, nous apprenons à juger de la forme des objets, de leurs couleurs, de leur position, de leurs dimensions et de leurs distances, à saisir le relief ou la solidité de chacun d'eux. Quand cette éducation est aussi complète et parfaite que possible, et que d'ailleurs nous ne sommes point atteints de défauts dans la conformation de nos organes visuels, dans la sensibilité de la rétine, chose plus rare qu'on ne pense, alors nous disons que nous voyons les objets tels qu'ils sont en réalité. Cependant, même dans cette hypothèse, les objets peuvent se présenter de telle façon que notre jugement ne soit pas conforme à cette réalité, que la sensation nous semble autre que ce qu'elle devrait être, ainsi qu'un contrôle facile permet de s'en assurer.

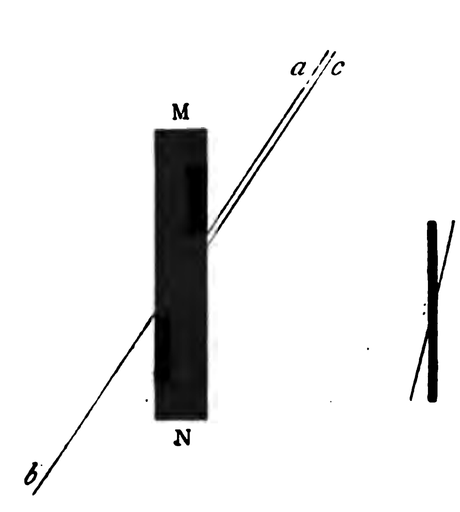


Fig. 228. — Illusion d'optique.

Par exemple, habituellement, à la vue de lignes droites tracées géométriquement, nous reconnaissons très promptement leurs directions vraies, leurs positions relatives exactes.

Or à l'examen de la figure 228, formée d'un large trait noir et de deux lignes parallèles plus fines *a* et *b* qui le coupent suivant un angle aigu, l'œil croit que la ligne *b* se prolonge suivant la ligne *c*; il n'en est rien cependant, ainsi qu'on peut le constater aisément. Cette erreur de jugement sur la direction

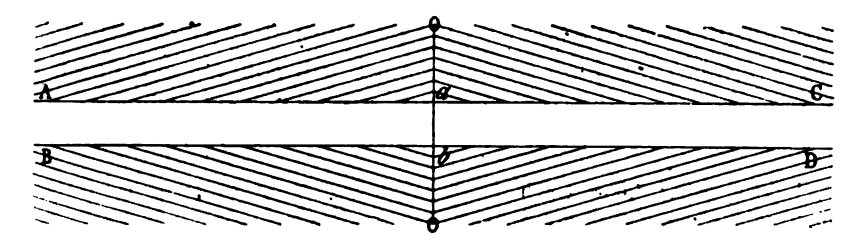


Fig. 229. — Illusion d'optique : apparente divergence de lignes parallèles.

des lignes n'est pas moins forte, quand on donne une moindre épaisseur au trait noir traversé par la ligne mince.

Un autre genre d'illusion est celui que présentent les figures 229 et 230. Deux lignes parallèles sont coupées par des obliques extérieures dirigées de chaque côté en sens contraire.

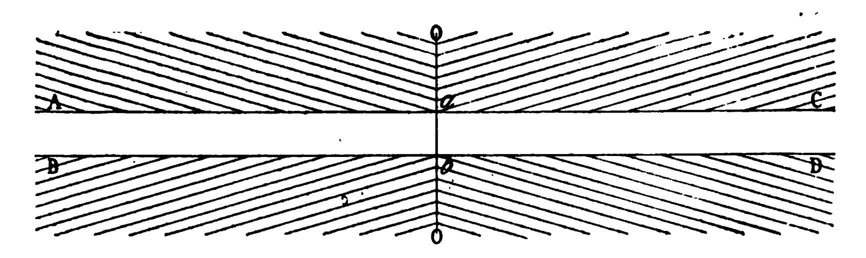


Fig. 230. — Apparente divergence de lignes parallèles.

Cette disposition suffit pour nous empêcher de reconnaître le parallélisme des lignes. Il semble qu'elles convergent vers une direction opposée à celle où iraient se réunir les obliques qui les rencontrent. Dans la figure 231, l'illusion est d'autant plus frappante que les effets des deux premières s'ajoutent. Les bandes noires verticales semblent donc alternativement convergentes et divergentes. De plus, les traits qui les coupent, bien qu'ils traversent les bandes en ligne droite, ne sont pas en

apparence dans le prolongement les uns des autres; l'effet est celui de l'illusion optique représentée dans la figure 228.

La raison de ces fausses apparences n'est pas aisée à trouver. On a invoqué l'irradiation, puis les mouvements involontaires de l'œil ; d'après Helmholtz, en fixant un point précis du dessin, les illusions disparaissent : ce qui est exact sans doute pour l'éminent physicien, mais ne l'est pas pour d'autres vues.

Où l'irradiation joue certainement un rôle, c'est dans la

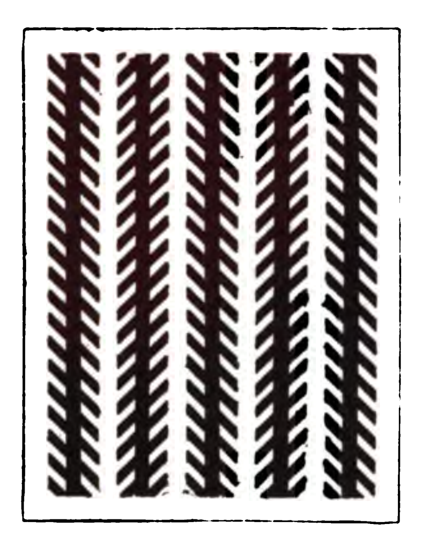


Fig. 231. — Convergence et divergence alternatives de lignes parallèles.



Fig. 232. — Forme hexagonale apparente de cercles tangents : effet d'irradiation.

manière dont on voit une série de cercles tangents, soit que ces cercles se détachent en blanc sur un fond noir, soit qu'au contraire ils soient noirs sur fond blanc. Dans les deux cas, on croit voir des hexagones et non des cercles ; tantôt ce sont les cercles blancs qui paraissent par leur empiètement détruire les espaces noirs ; tantôt ce sont au contraire les intervalles blancs qui rétrécissent les cercles noirs, et comme l'effet se produit autour des six points de tangence, il en résulte pour les cercles l'apparente forme hexagonale de ces derniers. M. A. Nachet, dans la *Nature* (n° 90 du 20 février 1875), signale cette illusion comme ayant trompé les naturalistes qui observaient au micro-

scope les stries de certaines diatomées, et qui ont cru voir des hexagones là où, en réalité, il n'y a que des cercles ou mieux des hémisphères.

Des illusions optiques qui se rapportent à la direction des lignes, à la forme des figures, on peut passer à celles qui regardent les dimensions des objets. Une ligne divisée paraît généralement plus longue qu'une ligne égale sur laquelle l'œil n'a aucun point de repère. De là vient que si l'on regarde un carré formé de traits équidistants, il prend l'aspect d'un rectangle dont la plus grande dimension est celle qui est divisée. Un objet divisé par des lignes horizontales semble perdre de sa hauteur. Au contraire, il paraît plus élevé s'il est divisé par des lignes verticales. Un faisceau de colonnettes minces paraîtra plus haut qu'une colonne unique qui aurait même hauteur et aussi même largeur que le faisceau. C'est là une des raisons qui donnent aux nefs des églises gothiques une élévation apparente considérable : une voûte de même hauteur, dans un édifice d'architecture romane ou grecque, paraîtra plus écrasée[1].

La lente et progressive éducation du sens de la vue nous permet de juger, avec une exactitude qui varie d'ailleurs selon les individus, des distances réelles et relatives des objets et de leurs dimensions réelles, que nous rapportons du reste généralement aux distances présumées. Nous verrons plus loin que cette appréciation des distances est liée à une autre impression qu'on nomme l'*impression du relief*, laquelle tient à la vision simultanée des deux yeux. En décrivant les instruments nommés *stéréoscopes*, nous reviendrons sur ce sujet. Mais nous ne terminerons pas ce paragraphe sans rappeler une illusion que tout le monde a éprouvée : c'est celle qui nous fait paraître les objets célestes plus grands à l'horizon qu'au zénith ou qu'à toute autre altitude. Le disque du Soleil à son lever et à son coucher, celui de la Lune dans les mêmes circonstances sont notablement

1. Dans un ordre différent de considérations esthétiques, on sait que les vêtements rayés horizontalement conviennent aux personnes de haute taille et de peu d'embonpoint; les étoffes rayées verticalement aux personnes petites et corpulentes. On peut faire l'application de ces faits d'observation à bien d'autres cas.

plus gros à l'horizon qu'au méridien[1] : il en est de même des constellations. Quand le quadrilatère d'Orion se lève, il paraît immense en comparaison de l'aspect qu'il présente à l'instant de sa culmination.

L'illusion est évidente. Les explications qu'on en a données sont moins concluantes. Elles se réduisent à deux : les uns ont attribué le phénomène à la forme apparente de la voûte céleste, forme qui n'est pas hémisphérique, mais plutôt ellipsoïdale ou

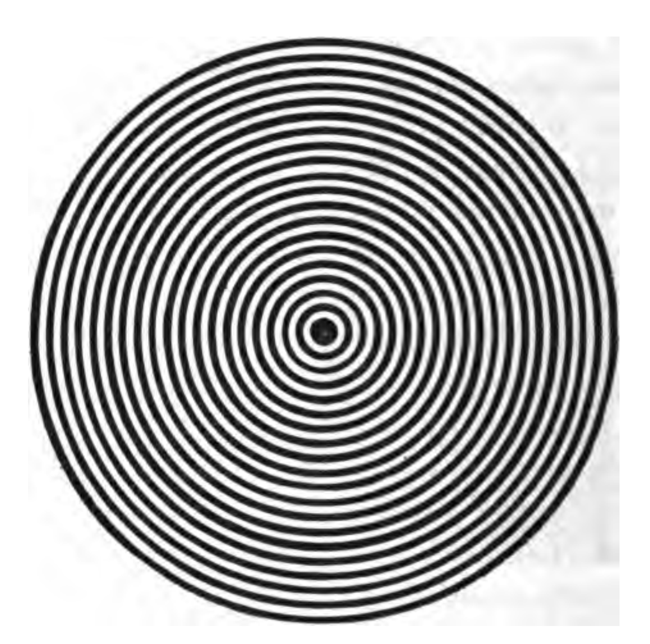


Fig. 233. — Expérience d'astigmatisme.

surbaissée, dès lors moins élevée au-dessus de nos têtes qu'à l'horizon. Suivant Euler, cette forme nous fait croire que les objets situés à l'horizon sont plus éloignés de nous qu'au zénith : Or, à égalité de dimensions apparentes, ce sont les objets qu'on suppose les plus rapprochés qui paraissent les plus petits. De là l'illusion qui nous porte à juger la Lune d'autant moins grosse

1. Pour la Lune, l'effet est d'autant plus surprenant que les dimensions apparentes ou angulaires du disque sont au contraire un peu plus petites, quand l'astre est à l'horizon que s'il est au zénith. A l'horizon, la Lune est plus éloignée de l'observateur de presque toute la longueur d'un rayon de la Terre. Son diamètre devrait donc sembler plus petit, et c'est l'inverse qui a lieu.

qu'elle a une plus grande altitude. Une autre opinion rend compte de l'illusion par le fait qu'à l'horizon la Lune se trouve dans le voisinage apparent d'objets auxquels nous pouvons la comparer et dont les dimensions nous sont connues, comme des arbres, des maisons. Une semblable comparaison est impossible au zénith, et la Lune isolée est ainsi réduite à ses vraies dimensions apparentes, qui ne sont qu'une faible fraction du contour du ciel.

Il est bien possible du reste que l'illusion soit due simultanément à ces deux causes. Il en faut probablement ajouter une troisième, qui est la faible intensité de la lumière des disques lunaire ou solaire, affaiblie par l'interposition des couches de vapeur beaucoup plus épaisses à l'horizon qu'au zénith.

Nous venons de parler des illusions optiques, en entendant par là les fausses apparences que prennent les objets dans certaines circonstances, pour un œil sain ou normal. Les exemples que nous avons cités auraient pu être considérablement multipliés. Mais il existe d'autres illusions qui ont pour cause la défectuosité de l'organe visuel ou certaines altérations morbides, et dont l'étude est par conséquent de la compétence du physiologiste beaucoup plus que de celle du physicien. Néanmoins, nous en citerons un ou deux cas, parce qu'ils sont beaucoup plus fréquents qu'on ne le croirait.

Commençons par signaler un défaut de la vue qui existe même dans un œil normal, bien qu'il y soit moins marqué. C'est celui qu'on nomme *astigmatisme*. En regardant avec attention d'un seul œil les cercles concentriques de la figure 233, on observera de notables différences dans la netteté de la vision dans des secteurs opposés des cercles. Selon certains diamètres, les lignes noires et blanches se distingueront nettement; selon d'autres, il y aura confusion, et la surface des secteurs paraîtra comme nuageuse, grisâtre. La position de ces secteurs d'apparences diverses dépendra de l'accommodation de notre œil.

L'explication de l'astigmatisme est dans la conformation ou

la courbure des surfaces réfringentes de l'œil, qui n'est pas symétrique dans tous les sens, de sorte que les rayons n'y ont pas le même foyer dans un plan horizontal que dans un plan vertical. Quand l'œil est accommodé pour la vision distincte des arcs horizontaux, il ne l'est pas pour les arcs verticaux, et réciproquement.

Un autre défaut de la vue consiste à ne pas distinguer certaines couleurs, ou bien à en distinguer un nombre moindre que les yeux normaux. On nomme *achromatopsie* cette affection connue encore sous le nom de *daltonisme*, parce que le célèbre chimiste Dalton l'étudia le premier sur lui-même. « Les individus chez lesquels cet état est complètement développé, dit Helmholtz, ne voient dans le spectre que deux couleurs, qu'ils désignent ordinairement sous les noms de *bleu* et de *jaune*. A cette dernière ils rapportent tout le rouge, l'orangé, le jaune et le vert. Ils appellent *gris* les tons bleu-verdâtre, et nomment *bleu* tout le reste. Lorsque le rouge extrême est faible, ils ne le voient pas du tout; ils ne le voient que lorsqu'il est intense. C'est pour ce motif qu'ils indiquent ordinairement comme limite du spectre une partie où les yeux normaux voient encore distinctement un rouge faible. Parmi les couleurs des corps, ils confondent le *rouge* (c'est-à-dire le cinabre et l'orangé rougeâtre) avec le brun et le vert, dans les cas où les yeux normaux voient, en général, le rouge avec bien plus d'intensité que le brun et le vert. Ils ne distinguent pas le *jaune d'or* du *jaune*, ni le *rose* du *bleu*. » (*Optique physiologique*.)

Ce défaut est assez répandu pour que les compagnies de chemins de fer aient cru devoir, depuis un certain nombre d'années, faire passer des examens spéciaux à ceux de leurs employés, mécaniciens ou autres, qui se trouvent appelés à faire ou à observer des signaux. Les feux blancs, rouges et verts ou les disques de même couleur correspondent à des indications opposées, et la confusion de ces couleurs pourrait être excessivement dangereuse.

Un autre défaut singulier de la vue a été signalé par Wollaston en ces termes : « A la suite d'un violent exercice, dit-il, je reconnus subitement que je ne pouvais voir que la moitié de la figure d'un homme qui se trouva sur mon chemin ; le même effet avait lieu, quel que fût l'objet que je regardasse. Ayant essayé de lire le nom JOHNSON sur une porte, je voyais seulement ... SON : le commencement du mot était totalement caché à mes regards. La perte de la vue, dans cet exemple particulier, avait eu lieu à gauche, soit que je regardasse avec l'un ou avec l'autre œil. Cette cécité n'était pas néanmoins tout à fait complète ; mais les objets paraissaient couverts d'une ombre intense et sans limites bien définies. La maladie dura peu de temps : en un quart d'heure elle s'était entièrement dissipée. La sensibilité revint graduellement en partant du centre et en s'avançant obliquement vers la gauche en montant. » Wollaston éprouva plus tard un second accès de cette affection, de cette *demi-cécité*, et il en observa chez un de ses amis un cas qui persista. « Le champ est assez étendu, dit-il, pour que mon ami puisse lire parfaitement ; il voit ce qu'il écrit, la plume qu'il emploie, mais non pas la main qui la conduit. » Arago, en rapportant ces faits, dit que l'affection décrite par Wollaston est assez commune. Il connaissait quatre personnes qui y étaient sujettes, et lui-même en avait éprouvé plusieurs atteintes. Cette insensibilité d'une moitié de la rétine semble comme une extension de la *tache aveugle*.

On nomme *hémiopsie* l'affection que nous venons de décrire.

§ 4. LA VISION CHEZ LES ANIMAUX.

L'organe de la vue chez les animaux vertébrés est à peu près conformé comme celui de l'homme : il en diffère surtout par les parties accessoires. Chez les espèces nocturnes, la pupille est plus large, la surface de la rétine plus étendue. Les animaux qui vivent dans l'obscurité ont des yeux tout à fait

rudimentaires : tels sont les rats aveugles d'Orient, les taupes, les anguilles. Les oiseaux ont un cristallin plus aplati que celui des mammifères, de sorte qu'ils sont naturellement presbytes. Le contraire a lieu chez les poissons, qui ont un cristallin sphérique, le milieu plus dense où ils vivent nécessitant une lentille plus réfringente que chez les animaux aériens : les poissons sont myopes.

Les invertébrés ont des yeux conformés d'une tout autre manière ; généralement ils sont formés par la réunion d'une multitude de petits yeux isolés, dont chacun a un nerf optique ou plutôt une fraction du nerf optique. Selon J. Muller, chacun des yeux élémentaires des yeux à facettes qu'on remarque chez les insectes (fig. 234 et 235) ne perçoit qu'un point lumineux, et c'est la réunion de ces impressions multiples qui constitue l'image, comme elle résulte chez nous des impressions produites par la lumière sur les divers points de la rétine.

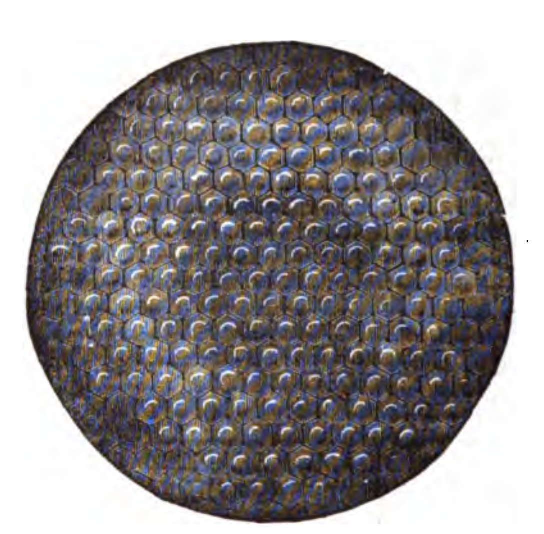


Fig. 234. — Œil composé des insectes ; cornée de mouche.

Les animaux voient-ils comme nous ? Sont-ce les mêmes radiations qui produisent chez eux la sensation lumineuse ? C'est là une question qui a été, croyons-nous, peu étudiée jusqu'ici. Néanmoins un de nos savants physiologistes, M. P. Bert, a fait quelques observations sur ce sujet. Voici comment il pose lui-même le problème à résoudre et comment il l'a résolu pour le cas particulier où il s'est placé.

« Tous les animaux, dit-il, voient-ils les rayons que nous appelons lumineux dans le spectre ? En voient-ils que nous ne

voyons pas? S'il y a identité dans l'étendue de la perception du spectre lumineux pour eux et pour nous, y a-t-il aussi identité dans l'énergie relative des sensations visuelles dans les diverses régions du spectre? » Il choisit pour sujets de ces expériences des animaux aussi éloignés de l'homme que possible par leur constitution générale et par la structure de leur œil. C'étaient les *Daphnies puces*, petits crustacés presque microscopiques très sensibles à la lumière et qui, la nuit, s'approchent vivement d'un flambeau qu'on leur présente. Placés dans un vase où la lumière ne pouvait pénétrer que par une fente étroite, ces animaux, qui nageaient indifféremment dans tous les points du liquide, se rassemblèrent en foule dans la direction de la fente, dès qu'on la rendit lumineuse en y faisant tomber un faisceau de lumière électrique, dispersée par un prisme. « On les fait ainsi accourir, qu'on leur envoie les rayons rouges, les rayons violets, ou la série intermédiaire. » La région ultra-violette du spectre ainsi que la région des rayons obscurs du rouge extrême les laissèrent, au contraire, indifférents. Mais les parties du spectre les plus brillantes, le jaune, le rouge, le vert, les attiraient manifestement plus que le bleu et le violet. « Ainsi, conclut M. Bert, premier point établi, les Daphnies puces perçoivent à l'état lumineux tous les rayons que nous voyons nous-mêmes; second point, ils ne perçoivent à l'état lumineux aucun des rayons que nous ne voyons pas nous-mêmes; enfin, l'énergie relative des sensations visuelles dans les diverses régions du spectre est la même chez ces animaux et chez nous. » Maintenant faut-il, comme notre savant compatriote, généraliser les conclusions précédentes et admettre que tous les animaux, dans

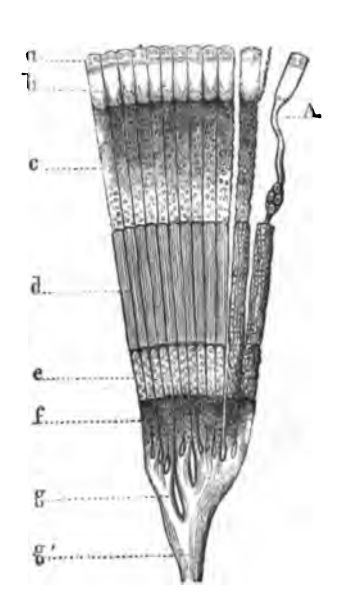


Fig. 235. — Structure de l'œil composé des insectes.

la série entière, voient les mêmes rayons avec la même intensité relative ? De nouvelles observations faites sur un plus grand nombre de types zoologiques pouvaient seules confirmer ou infirmer cette manière de voir. On doit à sir John Lubbock les expériences suivantes faites sur des fourmis. Ayant placé quelques fourmis avec leurs larves dans un cadre de verre de dimensions juste suffisantes pour permettre à ces animaux de se mouvoir librement, il couvrit une partie du cadre d'une substance opaque : il vit aussitôt les fourmis transporter leurs larves dans la région sombre. Plaçant alors devant le cadre deux verres, l'un jaune, l'autre violet, côte à côte, c'est toujours derrière le verre jaune que les jeunes étaient transportés. D'où M. Lubbock conclut que, pour les fourmis, la lumière violette est plus transparente que la lumière jaune. D'autres expériences lui ont fait croire que les rayons ultra-violets sont perçus par les fourmis. En résumé, il semble probable que les divers rayons du spectre agissent sur ces insectes autrement que sur l'homme.

Enfin, il paraît certain que la lumière peut exercer une influence spéciale sur certains animaux dépourvus d'organes de la vision. La nature de la perception que ces animaux éprouvent alors semble difficile à définir ; mais ce fait est par lui-même assez curieux pour que nous le mentionnions ici. On connaissait déjà un assez grand nombre d'animaux inférieurs qui, dépourvus de tout organe extérieur de la vision, sont néanmoins sensibles à l'action de la lumière : par exemple, les polypes d'eau douce, les balanes. M. Georges Pouchet a récemment reconnu et étudié cette même sensibilité chez les larves de mouches, connues sous le nom vulgaire d'*asticots*. Il a prouvé, par une suite d'expériences très décisives, que ces animaux perçoivent non seulement la lumière, mais savent apprécier la direction suivant laquelle elle leur arrive : dans tous les cas, ils fuient la lumière, en se dirigeant parallèlement à la route suivie par les rayons. « Cette perception, dit-il, ne se fait point par l'entremise des organes sensitifs apparents sur le premier an-

neau (elle persistait même après la section de ces organes). Se fait-elle par les bourgeons oculaires flottant dans la cavité viscérale, ou par quelque organe ignoré, ou bien est-ce toute la couche hypodermique qui est sensible à la lumière? Celle-ci, dans ce cas, agit-elle comme sur les hydres vertes dans l'expérience de Tremblay, ou comme sur les grenouilles que l'on a aveuglées et qui savent *à la longue* se placer dans l'endroit de leur prison où elles recevront le plus de lumière? Il y a une très grande différence entre ces derniers actes qui ne supposent qu'une perception lente et obscure de la lumière, et ceux de l'asticot. Ici la perception est rapide, instantanée, et de plus la direction est *immédiatement* perçue : en sorte qu'il est difficile de ne pas rapprocher cette perception de l'asticot, quelle qu'elle soit, des perceptions fournies par les organes sensitifs proprement dits, et même notablement parfaits, puisqu'ils perçoivent à la fois la direction et l'intensité. »

Toutes les questions ainsi posées, et bien d'autres que chacun peut se faire, relatives aux sensations lumineuses qu'éprouvent les êtres vivants, à l'influence qu'exerce la lumière sur leurs organes, sur leurs vies, sont du domaine de la physiologie, plutôt que de la physique. Mais, pour les résoudre, c'est aux méthodes expérimentales des physiciens qu'il faut avoir recours nécessairement ; et l'on peut voir ainsi combien l'étude de la partie de la Physique que nous venons d'exposer sommairement dans cet ouvrage peut avoir d'importance pour les progrès des sciences naturelles elles-mêmes.

CHAPITRE XVIII

LA LUMIÈRE ET LA VIE

§ 1. INFLUENCE DE LA LUMIÈRE SUR LA VIE VÉGÉTALE.

Nous avons énoncé, au début de cet ouvrage, une vérité qui ne semble pas avoir besoin de démonstration, lorsque nous avons dit que la lumière est, à la surface du globe terrestre, une des conditions de la vie, aussi essentielle à l'existence des végétaux qu'à celle des animaux. Mais si tout le monde accepte cette affirmation comme évidente, on ne se rend pas toujours aussi bien compte du mode d'intervention de l'agent lumineux dans les phénomènes du monde organique. Nous allons rappeler très sommairement ce que la science permet aujourd'hui de dire sur cette intéressante question.

Voyons d'abord quelle est l'influence de la lumière sur la végétation.

Tant que la plante se trouve dans la période de son développement qu'on nomme *germination*, la lumière n'a sur elle aucune influence ni utile ni nuisible. L'humidité, la présence de l'oxygène, un certain degré de chaleur sont autant de conditions indispensables aux graines pour germer : il n'en est pas ainsi de la lumière; mais il ne paraît pas qu'elle soit nuisible, comme le firent croire des expériences faites au siècle dernier par Senebier et Ingenhousz. Voici ce que dit à cet égard M. Dehérain, dans son *Cours de chimie agricole :* « Th. de Saussure a reconnu que des graines placées les unes dans des vases opa-

ques, les autres dans des verres transparents, mais garanties de la lumière directe du Soleil, ont germé en même temps, et il est probable que c'est surtout par la dessiccation qu'ils opèrent, que les rayons solaires sont nuisibles à la germination. Si une lumière ménagée ne paraît pas défavorable, elle n'est pas non plus utile : les grains germent parfaitement dans l'obscurité, et c'est généralement dans des caves que les brasseurs préparent le malt, c'est-à-dire l'orge germée, employée à la fabrication de la bière. »

Il y a un siècle environ que les premières expériences sur l'influence de la lumière dans l'acte de la végétation ont eu lieu. Priestley reconnut d'abord que les plantes vivantes produisent des effets contraires à ceux de la respiration animale, « et tendent à conserver l'atmosphère douce et salubre, lorsqu'elle est devenue nuisible en conséquence de la vie et de la respiration des animaux ou de leur mort et de leur putréfaction ». Ingenhousz reconnut bientôt après que les plantes exposées au Soleil dégagent de l'oxygène; et enfin Senebier acheva la découverte, en montrant que cet oxygène provient de la décomposition de l'acide carbonique de l'air, décomposition opérée sous l'influence de la lumière du Soleil par l'acte de la végétation.

Depuis, une foule de savants, physiologistes et physiciens, ont étudié sous toutes ses faces et dans toutes ses particularités ce phénomène d'une si haute importance.

Ce sont les parties vertes des plantes, les cellules à *chlorophylle*, qui jouissent de cette propriété de décomposer l'acide carbonique de l'air sous l'influence des rayons lumineux, d'éliminer l'oxygène de ce gaz et de fixer le carbone, que la plante s'assimile alors et dont elle compose sa partie combustible. De Saussure a prouvé que les parties vertes sont incapables d'effectuer cette décomposition, ou plutôt qu'elles consomment de l'oxygène pour le rendre sous forme d'acide carbonique.

Cette expérience fondamentale se démontre, dans les cours, de la manière suivante : Un grand flacon plein d'eau tenant en dissolution une faible quantité d'acide carbonique ren-

ferme une plante marécageuse. Le flacon muni d'un tube abducteur est placé au soleil. On voit bientôt les feuilles se recouvrir de bulles de gaz, qui se rendent sous l'éprouvette, et l'on obtient en dernier lieu un gaz assez riche en oxygène pour rallumer des allumettes qu'on vient d'éteindre et dont le bout est resté incandescent. Le dégagement du gaz augmente ou diminue selon qu'augmente ou diminue l'intensité de la lumière dont les végétaux sont frappés; dans l'obscurité, il s'arrête complètement.

Pendant la nuit, les plantes vivent à la façon des animaux: elles absorbent de l'oxygène et émettent de l'acide carbonique.

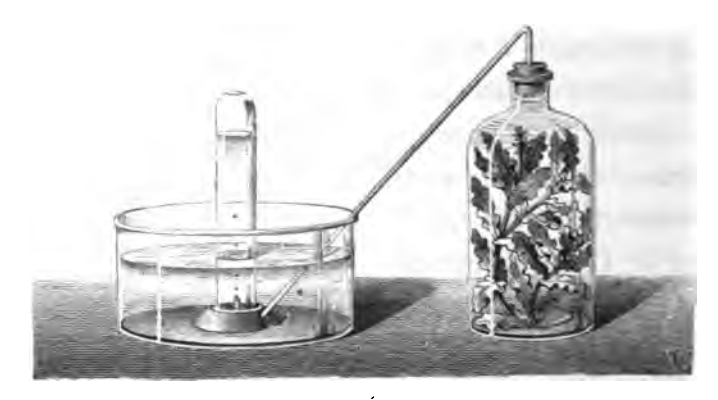


Fig. 236. — Appareil Cloëz et Gratiolet. Décomposition de l'acide carbonique par les plantes aquatiques au soleil.

Seulement, comme l'a constaté M. Corenwinder, « la quantité d'acide carbonique décomposée le jour, au soleil, par les feuilles des plantes, est beaucoup plus considérable que celle qui est exhalée par elles pendant la nuit. Le matin, il leur suffit souvent de trente minutes d'insolation pour récupérer ce qu'elles peuvent avoir perdu pendant l'obscurité. »

Une curieuse observation faite par M. Dehérain montre bien l'importance de la présence ou de l'absence de la lumière pour cette double fonction des plantes. La surface d'un étang du domaine de Grignon se trouva, en juillet 1868, absolument couverte par les feuilles d'une petite plante qu'on nomme *lentille d'eau*, au point que le niveau de l'eau formait un réseau

assez résistant pour permettre aux petits oiseaux d'y marcher. Bientôt on vit arriver à la surface une quantité de poissons morts. M. Dehérain crut d'abord à un empoisonnement par l'hydrogène sulfuré; mais la présence des oiseaux d'eau qui garnissaient l'étang, sans rien ressentir, lui prouva que là n'était pas la cause de la mort des poissons. Des expériences lui démontrèrent que ces animaux avaient dû périr asphyxiés; que la lentille d'eau avait formé à la surface de l'étang une couverture assez épaisse pour empêcher l'accès des rayons lumineux, que les plantes submergées ainsi plongées dans l'obscurité avaient dû absorber l'oxygène dissous et le transformer en acide carbonique.

On pourrait croire, d'après les propriétés spéciales des rayons du spectre, que l'action de ces rayons sur l'assimilation du carbone par les plantes doit être surtout due aux radiations chimiques. Or il n'en est rien. Les études faites sur ce point spécial (par MM. Daubeny, Draper, Cloëz, Cailletet) ont démontré que, à égalité d'intensité lumineuse, ce sont les rayons rouges et jaunes qui sont les plus efficaces; les rayons verts, bleus et violets sont beaucoup moins actifs à ce point de vue. C'est la lumière verte qui est la moins active : elle ne provoque aucune décomposition et semble même favoriser le dégagement de l'acide carbonique. M. Cailletet ayant placé « sous une cloche de verre vert éclairée par les rayons directs du Soleil une éprouvette contenant de l'air pur et une feuille, obtint, après plusieurs heures, une quantité d'acide carbonique peu inférieure à celle qui serait produite par les mêmes feuilles dans l'obscurité. C'est probablement, ajoute-t-il, en raison de cette singulière propriété de la lumière verte, qui doit produire après un temps assez court l'étiolement des plantes sur lesquelles elle agit, que la végétation est généralement languissante et chétive sous les grands arbres, quoique l'ombre qu'ils portent soit souvent peu intense. »

La lumière a encore sur la végétation un genre d'influence qui a été soupçonné dès le siècle dernier par Guettard, et que

M. Dehérain a mis en pleine évidence. Guettard reconnut que les plantes évaporent plus d'eau pendant le jour que pendant la nuit, et qu'il fallait qu'elles fussent directement frappées par les rayons du Soleil pour atteindre leur maximum d'évaporation. M. Dehérain, dans une suite de nombreuses et délicates expériences, a prouvé que l'évaporation de l'eau par les feuilles est due à la lumière et non à la chaleur; il a reconnu, comme l'avait vu Daubeny, que les divers rayons du spectre n'ont pas sur le phénomène le même degré d'influence : les rayons lumi-



Fig. 237. — Influence des rayons de diverses couleurs sur l'évaporation des feuilles. Expériences de M. Dehérain.

neux efficaces pour déterminer l'évaporation sont précisément ceux qui provoquent la décomposition de l'acide carbonique, ce que l'on constate soit au moyen de l'appareil de la figure 238 où les feuilles enfermées dans des tubes de verre sont exposées en des rayons différents du spectre, soit en entourant simplement les tubes de manchons renfermant diverses solutions colorées (fig. 237).

Ainsi, parmi les phénomènes de la vie végétale, deux des plus importants sont sous l'influence immédiate des radiations lumineuses : d'une part, la décomposition de l'acide carbonique, d'où l'assimilation du carbone par la plante; de l'autre, l'éva-

poration par les feuilles, qui joue un rôle prépondérant dans le transport des principes immédiats d'un point du végétal à l'autre. Il résulte de là que, de deux années également chaudes, mais dont l'une a été caractérisée par un ciel couvert et l'autre par un soleil éclatant, c'est cette dernière qui est la plus favorable à la végétation. M. Dehérain cite des faits à l'appui de cette conclusion, et il rappelle ce passage du *Cosmos* où Humboldt signale l'importance de la lumière pour le développement

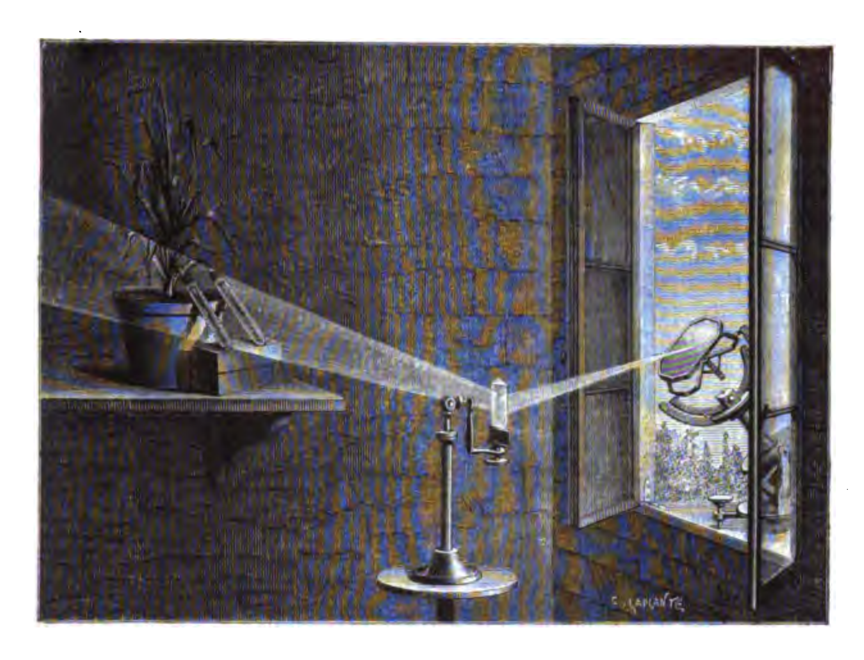


Fig. 238. — Expériences de M. Dehérain sur l'influence des rayons du spectre dans le phénomène d'évaporation des feuilles.

de la vie végétale : « Si là où les myrtes croissent en pleine terre (Salcombe sur les côtes de Devonshire, Cherbourg sur les côtes de Normandie), et où le sol ne se couvre jamais en hiver d'une neige persistante, les températures d'été et d'automne suffisent à peine pour porter les pommes à maturité; si la vigne, pour donner un vin potable, fuit les îles et presque toutes les côtes, même les côtes occidentales, ce n'est pas seulement à cause de la température qui règne en été sur le littoral; la raison de ces phénomènes est ailleurs que dans les indications

fournies par nos thermomètres, lorsqu'ils sont suspendus à l'ombre. Il faut la chercher dans l'influence de la lumière directe, dont on n'a guère tenu compte jusqu'ici, bien qu'elle se manifeste dans une foule de phénomènes. Il existe, à cet égard, une différence capitale entre la lumière qui a traversé un ciel serein et celle qui a été affaiblie et dispersée en tout sens par un ciel nébuleux. »

§ 2. INFLUENCE DE LA LUMIÈRE SUR LA VIE ANIMALE.

L'existence et le développement du règne animal à la surface de la Terre sont subordonnés à l'existence et au développement de la vie végétale. C'est là un fait d'une telle évidence, qu'il est tout à fait inutile d'insister; de sorte qu'indirectement la lumière, sans laquelle aucune plante à chlorophylle ne saurait vivre, se trouve indispensable aussi à la vie animale.

Quant à l'influence directe de la lumière sur telle ou telle fonction essentielle de l'animal, bien qu'elle n'ait point été étudiée et analysée encore dans son mode spécial d'action, il n'est pas moins certain qu'elle existe : pour se développer et pour vivre, pour jouir de la santé physique dans sa plénitude, l'homme et la plupart des animaux ont un égal besoin de la lumière.

Quelle différence, sous le rapport de la vigueur et de la santé, entre les populations qui vivent en plein air et reçoivent largement les rayons du soleil, et celles qui se pressent dans les rues étroites et obscures des villes! Quel contraste entre la vivacité, la force musculaire des animaux et des hommes habitants des régions tropicales, et la lenteur inerte des Lapons, des Samoyèdes, des ours polaires! « On a des exemples nombreux, dit Dubrunfaut, de maladies, d'infirmités ou d'accidents divers que peut produire la privation de la lumière. Telles sont les maladies qui atteignent les mineurs, les marins de la cale des navires, les ouvriers des manufactures mal éclairées, les habitants des caves, des rez-de-chaussée ou des rues étroites.

On connaît aussi les importantes observations de M. Edwards sur les batraciens et celles de Humboldt sur la vigueur des populations des régions équinoxiales. Ces populations à peau rouge, à formes musculeuses et arrondies, reçoivent directement l'influence bienfaisante de la lumière sur leurs corps entièrement nus. » (*Statique de la lumière dans les phénomènes de la vie.*)

Le savant auquel nous empruntons ces lignes soupçonnait que la lumière agissait sur l'organisme animal précisément par les rayons qui sont inefficaces au point de vue des phénomènes de la végétation. « La chlorophylle et les globules sanguins, ajoutait-il, n'offrent-ils pas les deux grands pivots de la vie organique des végétaux et des animaux, et les conditions de leur formation, en apparence similaires, ne sont-elles pas bien distinctes et bien définies par leurs modes d'être si différents vis-à-vis du stimulus lumineux? Il est donc parfaitement légitime de conclure de tous les faits connus et bien observés que la lumière blanche du Soleil, qui est indispensable à la vie normale des végétaux et des animaux, se partage sous leurs influences propres en deux faisceaux complémentaires, qui sont absorbés pour les besoins des fonctions assimilatrices. »

Les recherches faites depuis sur ce point intéressant ne semblent pas justifier tout à fait les conclusions de M. Dubrunfaut. M. Béclard, puis un Américain, le général Pleasonton, et enfin M. Emile Yung ont reconnu que ce sont les rayons les plus réfrangibles, c'est-à-dire les rayons violets, qui sont le plus favorables à la croissance des animaux. La lumière verte, nuisible à la végétation, le serait également à la vie animale, de sorte que les deux règnes se partageraient les radiations extrêmes. Il n'y a rien là que de très naturel, si l'on songe que la plante, pour vivre et croître, décompose l'acide carbonique de l'air, exhale de l'oxygène et fixe du carbone, tandis que l'animal absorbe de l'oxygène et dégage de l'acide carbonique. La différence des fonctions correspond bien à la différence des modes d'action des radiations lumineuses.

CHAPITRE XIX

LES MÉTÉORES OPTIQUES

§ 1. AURORES ET CRÉPUSCULES.

Quand l'atmosphère est pure, son illumination ou le degré de son éclat dépend généralement de la distance au Soleil de la région considérée. A mesure que le Soleil baisse ou s'approche de l'horizon, l'illumination atmosphérique diminue ; de plus, la couleur de l'atmosphère, de bleue qu'elle était d'abord, passe successivement au jaune et au rouge. Cet effet de coloration est évidemment produit par l'absorption des rayons du spectre les plus réfrangibles, absorption due à l'épaisseur de plus en plus grande des couches d'air traversées par la lumière du Soleil. La teinte bleue est due aux rayons réfléchis, la couleur jaunâtre ou rouge-orangé est au contraire celle des rayons transmis.

Un peu avant le coucher du Soleil, le ciel prend au zénith une teinte blanchâtre, tandis que l'illumination va en croissant à l'horizon occidental. Quand l'astre est descendu sous l'horizon, le rouge du ciel persiste, prenant d'ailleurs, suivant l'état de l'atmosphère, les nuances les plus variées, depuis le rouge de feu jusqu'au pourpre foncé. Des phénomènes semblables, mais suivant une marche opposée, s'observent avant le lever du Soleil. L'illumination plus ou moins prolongée de l'atmosphère, avant le lever comme après le coucher du Soleil, est le phénomène connu de tout le monde sous le nom de *crépuscule*, le crépuscule du matin se désignant plus ordinairement sous le nom d'*aurore*.

La durée du crépuscule est très variable, selon l'époque de l'année et l'état du ciel, mais aussi selon les climats. Si l'on admet, avec les astronomes, que l'aurore commence ou que le crépuscule finit lorsque, le matin, les étoiles de sixième grandeur sont effacées au zénith par la lumière atmosphérique ou que le soir les mêmes étoiles apparaissent (pour les vues moyennes bien entendu), l'observation constate qu'à l'un ou l'autre de ces moments le centre du Soleil est à une distance angulaire de 17° ou de 18° au-dessous de l'horizon. Il y a toutefois une différence entre le crépuscule du soir et celui du matin, la durée de ce dernier étant un peu moindre : ce qu'on attribue à la plus grande pureté de l'atmosphère, les vapeurs dont il était chargé le soir s'étant en grande partie précipitées sous l'influence du refroidissement nocturne.

La durée astronomique du crépuscule étant définie par le temps que le Soleil met à descendre de 18° sous l'horizon, on comprend la raison qui fait que, pour un lieu donné, c'est l'époque des équinoxes qui correspond aux crépuscules les plus courts, et celle des solstices aux crépuscules les plus longs. L'arc décrit sur son parallèle par le Soleil est une fraction d'autant plus grande de la circonférence diurne totale, que ce parallèle est plus éloigné de l'équateur céleste ; le temps qu'il met à le parcourir va donc en croissant de l'époque des équinoxes à celle des solstices. Pour une raison semblable, les crépuscules sont de plus en plus longs à mesure que de l'équateur terrestre on s'élève à des régions de plus grande latitude ; l'obliquité croissante des arcs diurnes du Soleil sur l'horizon explique alors l'allongement crépusculaire. Dans les zones polaires leur durée atteint leur maximum et les nuits des régions voisines du pôle ne sont à vrai dire que de longs crépuscules. C'est à peu près aussi ce qui arrive dans notre zone tempérée à l'époque du solstice d'été. A Paris, le jour du solstice, le Soleil à minuit, c'est-à-dire à l'heure de son plus grand abaissement sous l'horizon, ne se trouve pas à 17° : le crépuscule dure donc toute la nuit.

Mais il importe d'ajouter que ces différences sont tantôt atténuées, tantôt accentuées par les circonstances atmosphériques. Si le ciel est chargé de vapeurs, les crépuscules s'allongent; leur durée diminue, quand l'air est sec et le ciel serein, et c'est ainsi seulement qu'on peut se rendre compte de l'écart considérable que l'observation constate entre les durées réelles des crépuscules et celles qui résultent de leur définition astronomique.

« Dans l'intérieur de l'Afrique, dit Kœmtz, où l'air est quelquefois si pur et si transparent que Bruce, dans le Sennaar, voyait la planète Vénus en plein jour, la nuit succède immédiatement au coucher du Soleil. De l'autre côté des Alpes, en Dalmatie par exemple, il fait nuit une demi-heure après le coucher du Soleil. Entre les tropiques, le crépuscule est encore plus court : il dure un quart d'heure au Chili selon Acosta, et quelques minutes à Cumana, d'après M. de Humboldt; même phénomène sur la côte occidentale de l'Afrique. Ces résultats diffèrent singulièrement de ceux qu'indique le calcul, et d'après lesquels le crépuscule devrait durer au moins une heure. »

Après le coucher du Soleil, et à l'opposé, c'est-à-dire au-dessus de l'horizon oriental, on aperçoit ordinairement un segment d'une teinte bleu sombre, limité au-dessus par une teinte d'un léger rouge pourpre. La couche qui sépare ce segment du reste du ciel est quelquefois d'un blanc jaunâtre; on la nomme *courbe crépusculaire*, et son point le plus élevé, toujours opposé à la direction du Soleil au moment de l'observation, va en s'élevant progressivement au fur et à mesure que l'astre s'abaisse davantage sous l'horizon.

La courbe crépusculaire n'est pas autre chose que la limite des points qui reçoivent la lumière du Soleil et nous la renvoient par réflexion. C'est la ligne de séparation du cône d'ombre que la Terre projette derrière elle avec la surface limite de l'atmosphère; le segment obscur qu'on voit du côté de l'orient est formé des parties de l'atmosphère qui ne reçoivent pas la lumière solaire. Cependant on doit admettre que ces parties

ainsi directement éclairées réfléchissent elles-mêmes leur lumière à l'intérieur du cône d'ombre et ces réflexions successives étendent nécessairement les limites de la lueur crépusculaire.

On a cherché à déduire la hauteur de l'atmosphère de celle du point culminant de la courbe crépusculaire, à l'heure où celle-ci est suffisamment limitée et distincte. Le temps écoulé depuis le coucher du Soleil permet de calculer aisément la distance angulaire à laquelle l'astre se trouve en ce moment sous l'horizon ; c'est alors un simple problème de géométrie et de calcul, que de trouver de combien le point culminant dépasse verticalement le rayon de la Terre. M. Biot, utilisant des observations faites par Lacaille, a obtenu ainsi 59 kilomètres environ dans l'hypothèse que les rayons solaires n'avaient subi qu'une réflexion, et moins de 11 kilomètres dans l'hypothèse de deux réflexions successives, et il pensait que la hauteur de l'atmosphère devait être comprise entre ces deux limites. Aujourd'hui, par d'autres méthodes, on est arrivé à des nombres beaucoup plus forts, ce qui permet de supposer que la méthode dont nous venons de dire un mot n'est pas susceptible d'une grande précision.

Nous terminerons ce paragraphe en reproduisant d'après Kæmtz, qui n'a fait lui-même que résumer les observations populaires des cultivateurs et des marins, les indications ou pronostics du temps d'après l'aspect du ciel pendant les crépuscules et les aurores.

« Les apparences du crépuscule, dit-il, dépendant de l'état du ciel, il en résulte qu'elles peuvent servir à faire prévoir jusqu'à un certain point le temps du lendemain. Quand le ciel est bleu et qu'après le coucher du Soleil la région occidentale se couvre d'une légère teinte de pourpre, on peut assurer que le temps sera beau, surtout si l'horizon semble couvert d'une légère fumée. Après la pluie, des nuages isolés colorés en rouge et bien éclairés annoncent le retour du beau temps. Un crépus-

cule d'un blanc jaunâtre, surtout quand il s'étend au loin sur le ciel, n'est pas signe de beau temps pour le lendemain. Dans l'opinion des habitants de la campagne, on doit s'attendre à des orages lorsque le Soleil est d'un blanc éclatant et se couche au milieu d'une lumière blanche qui permet à peine de le distinguer; le pronostic est encore plus mauvais quand de légers *cirrus*, qui donnent au ciel un aspect blafard, paraissent plus foncés à l'horizon, et que le crépuscule est d'un rouge grisâtre au milieu duquel on voit des portions d'un rouge foncé qui passent au gris et permettent à peine de distinguer le Soleil : dans ce cas, la vapeur vésiculaire est très abondante, et on peut compter sur du vent et une pluie prochaine.

« Les signes tirés de l'aurore sont un peu différents : quand elle est très rouge, on doit s'attendre à de la pluie, tandis qu'une aurore grise annonce du beau temps. La raison de cette différence entre une aurore et un crépuscule gris vient de ce que le soir cette coloration dépend surtout des *cirrus*, le matin d'un *stratus* qui cède bientôt aux rayons du Soleil levant, tandis que les cirrus s'épaississent pendant la nuit. Si, au lever du Soleil, il y a assez de vapeurs condensées pour que le Soleil paraisse rouge, il est alors très probable que dans le cours de la journée le courant ascendant déterminera la formation d'une couche épaisse de nuages. » (*Météorologie*.)

§ 2. LE MIRAGE.

La réfraction des rayons lumineux qui ont à traverser, soit les couches entières de l'atmosphère, soit quelques-unes d'entre elles, donne lieu à plusieurs phénomènes, parmi lesquels nous avons décrit déjà l'élévation apparente des objets au-dessus de leur position réelle : ce qu'on nomme la réfraction atmosphérique. Le *mirage* est un phénomène dû à la même cause. On l'observe principalement à la surface des plaines de sable, quand le sol est fortement échauffé par les rayons du Soleil. Le voyageur

LE MIRAGE
dans les déserts de l'Afrique.

qui parcourt ces plaines voit alors les objets qui s'élèvent au-dessus du sol, réfléchis comme sur une nappe liquide. L'illusion est si forte, que ceux qui sont pour la première fois témoins du phénomène, ne peuvent s'empêcher de croire à l'existence réelle d'un lac étendant ses eaux à l'horizon. Les soldats français de l'expédition d'Égypte se sont plus d'une fois laissé prendre à cette apparence trompeuse. Accablés de fatigue et de soif, ils voyaient les bords du lac tant désiré fuir à mesure qu'ils approchaient, renouvelant pour eux, sous une forme non moins décevante, le supplice de Tantale. Monge, un des savants qui composaient l'Institut d'Égypte, donna le premier une expli-

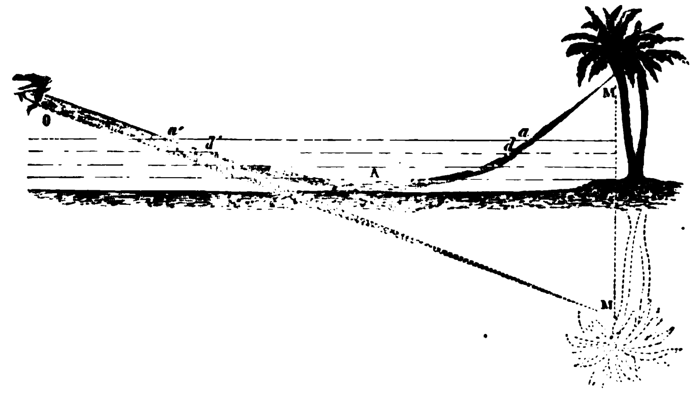


Fig. 239. — Explication du mirage.

cation complète du mirage, que d'ailleurs on n'observe pas seulement dans les déserts d'Afrique[1].

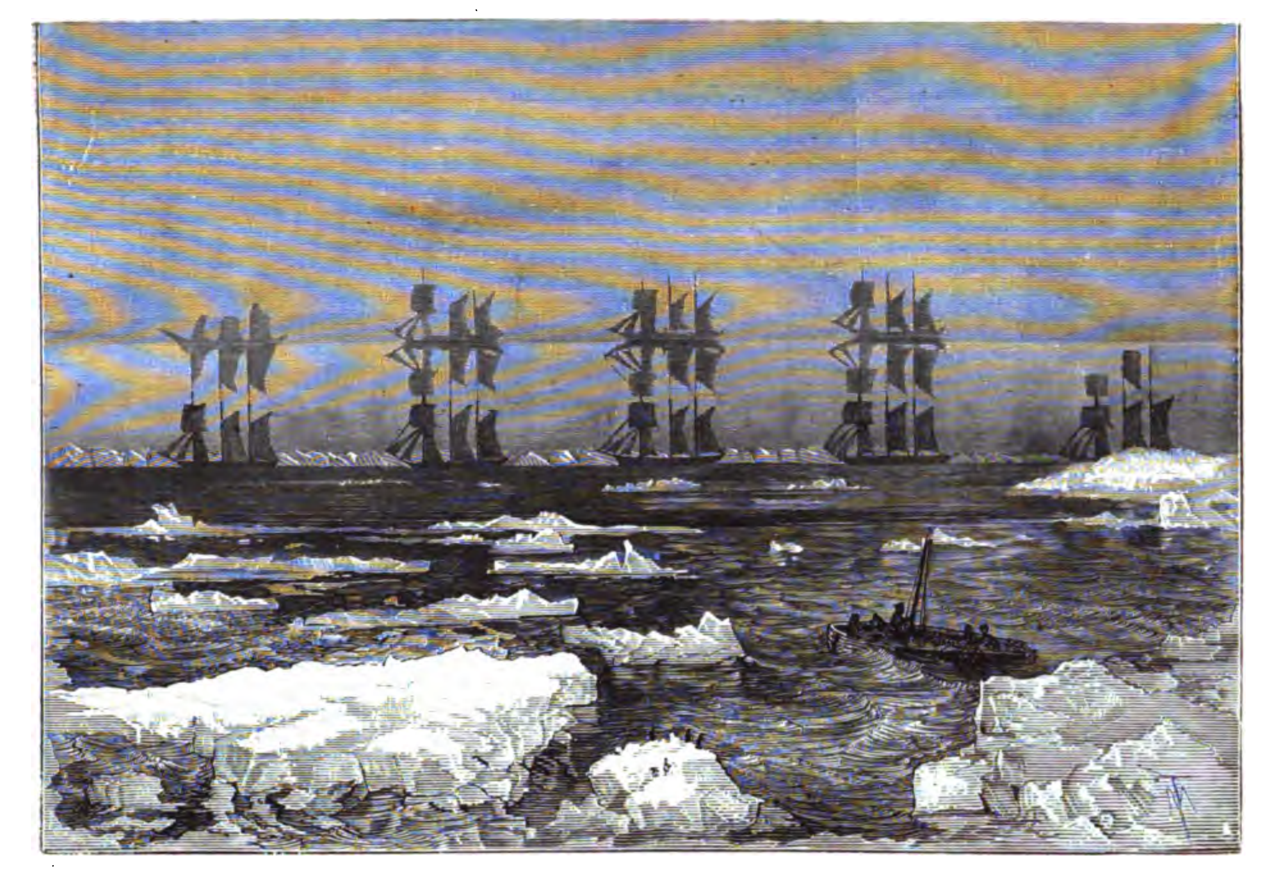
Voici quelle est, d'après lui, la théorie du mirage :

Les rayons solaires, en arrivant à la surface de la couche sablonneuse, l'échauffent très fortement, tandis qu'ils ont traversé les couches d'air superposées sans élever notablement leur température, le pouvoir absorbant des gaz étant très faible

1. Le phénomène du mirage a été observé très fréquemment par Mathieu et Biot à Dunkerque, sur le bord de la mer. Une plage sablonneuse située dans les dunes, près du fort du Risban, avait été choisie par eux pour leurs observations, que favorisait encore l'existence d'un grand nombre d'objets très éloignés, tels que des clochers, des arbres, des cabanes. Ils ont constaté qu'une différence de température de deux degrés centigrades suffisait pour [illegible] le phénomène du mirage.

relativement à celui des corps solides. Mais la chaleur du sol se communique par le contact à la couche d'air la plus basse et de celle-ci successivement à celles qui la surmontent. L'air dilaté tend bien à s'élever en vertu de sa légèreté spécifique; mais si le sol présente une surface de niveau à peu près horizontale et si l'atmosphère est calme, l'équilibre subsiste, et il ne se forme que de faibles courants produits par quelques inégalités dans la dilatation des diverses portions de la couche d'air inférieure. Il résulte de là que, vers le milieu du jour, les couches d'air voisines du sol sont rangées, de haut en bas, par ordre de densités décroissantes. Considérons alors un faisceau lumineux envoyé obliquement vers le sol par le point M d'un objet éloigné (fig. 239). En passant d'un milieu plus dense dans une couche raréfiée, il déviera en s'éloignant de la verticale, de *a* en *d*, et cette déviation ira en croissant à mesure qu'il rencontrera des couches de moins en moins réfringentes, jusqu'à ce que, tombant en A sur une couche avec la surface de laquelle il fait un angle égal à l'angle limite, il éprouvera la réflexion totale. A partir de ce point, il suivra une marche inverse, se rapprochant de plus en plus de la verticale et tombant en O dans l'œil de l'observateur, qui voit alors une image du point M en M', point de convergence des rayons formant le faisceau. La même marche s'appliquant à tous les points de l'objet — ici, c'est un arbre — celui-ci semblera réfléchi comme dans un miroir, et l'observateur en verra une image renversée. Le ciel se réfléchit de la même façon, d'où l'apparence brillante du sol à une certaine distance de l'objet, apparence qui fait croire à la présence d'une nappe liquide baignant le pied de celui-ci.

Le phénomène du mirage a lieu aussi à la surface de la mer, quand l'eau possède une température plus élevée que celle de l'air, et l'explication est la même que celle du mirage au-dessus du sol. Quand les couches d'air inégalement échauffées, au lieu d'être séparées par des surfaces horizontales, le sont plus ou moins obliquement, on a le mirage *latéral*, qui s'observe principalement dans les pays de montagnes, ou encore dans le voisi-



EFFET DE MIRAGE INVERSE.
Le navire *Hudson* dans les mers polaires.

nage des édifices : dans ce dernier cas, les objets paraissent réfléchis comme dans un miroir vertical. Il peut même arriver, ce qu'on observe quelquefois sur mer, que l'image de l'objet, d'un navire par exemple, se forme au-dessus de lui. Le fils du célèbre navigateur et physicien Scoresby a été témoin, dans les mers polaires, de ce dernier phénomène, auquel on donne alors le nom de mirage *inverse*. Il aperçut un jour dans les airs l'image renversée d'un navire que montait son père et dont une bourrasque l'avait séparé, et cette image avait assez de netteté pour qu'il pût reconnaître le navire, bien qu'il fût alors entièrement caché sous l'horizon. Pour expliquer ce phénomène, il faut supposer l'existence, à une certaine hauteur dans l'atmosphère, de couches d'air horizontales dont la densité diminue rapidement de bas en haut.

§ 3. L'ARC-EN-CIEL.

Tout le monde sait que l'arc-en-ciel ou iris se montre à l'opposé du Soleil, au travers des nuages qui se résolvent en pluie, et qu'il est tantôt simple, tantôt accompagné d'un arc extérieur ordinairement moins brillant que le premier. L'*arc principal* ou *intérieur* forme une bande circulaire dans la largeur de laquelle on aperçoit toutes les couleurs du spectre rangées du violet au rouge, en allant de l'intérieur à l'extérieur. L'arc secondaire, plus large que le premier, offre les mêmes couleurs disposées dans un ordre contraire, de sorte que le rouge est en dedans, vis-à-vis du rouge de l'arc principal. La planche XIII montre quelle est cette disposition, et donne une idée exacte de la largeur et de l'état relatif des arcs, ainsi que des dimensions apparentes de la zone qui les sépare.

Pour nous rendre compte des conditions qui président à la production du phénomène, nous allons examiner quelle est la marche suivie par un rayon solaire, quand il tombe sur la surface d'une goutte sphérique de pluie. En arrivant à la surface de la sphère, le rayon lumineux se réfracte, se rapproche

de la normale au point d'incidence ou du rayon, et suit une corde du grand cercle dans le plan duquel nous le supposons dirigé. En rencontrant la surface intérieure de la sphère liquide, il se partage, émerge en partie, et se réfléchit pour l'autre partie. La même chose arrive à chacune des rencontres du rayon réfléchi, dont l'intensité va en diminuant, au fur et à mesure que s'accomplissent ces réflexions successives. Connaissant l'angle d'incidence du rayon lumineux, on peut calculer l'angle d'émergence du rayon qui sort de la sphère liquide, après une, deux ou un nombre quelconque de réflexions intérieures.

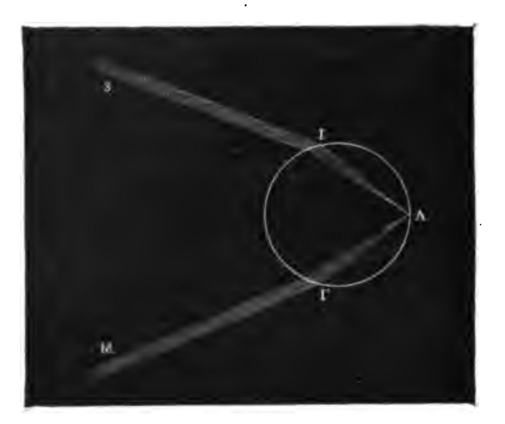


Fig. 240. — Marche des rayons efficaces dans une goutte de pluie, après une seule réflexion intérieure.

Au lieu d'un seul rayon de lumière, si l'on considère un faisceau tel que SI, les angles d'incidence des rayons qui composent le faisceau n'étant pas les mêmes, les rayons émergents sortiront en général en divergeant de la sphère, de sorte que, dispersés dans l'espace, ils ne pourront agir sur l'œil ni produire une image sur la rétine à une distance un peu considérable. Cependant le calcul prouve que, pour certaines incidences[1], les rayons émergents forment un faisceau

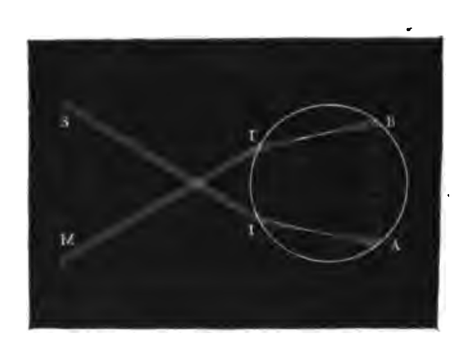


Fig. 241. — Marche des rayons efficaces après deux réflexions intérieures.

1. Ces incidences sont celles qui jouissent de la propriété de rendre minimum le changement de direction du rayon émergent. Alors les rayons qui tombent sur la surface de la

ARC-EN-CIEL DOUBLE

cylindrique dont l'intensité restera sensiblement la même à une distance un peu considérable. Newton a donné le nom de *rayons efficaces* à ceux qui jouissent de cette propriété. Il résulte de là que toutes les gouttes de pluie qui se trouveront dans une situation propre à renvoyer à l'œil de l'observateur leurs rayons efficaces, sembleront plus lumineuses que les autres, et formeront sur la nuée une zone plus brillante que les régions voisines.

Maintenant rappelons-nous que les divers rayons colorés dont se compose un faisceau de lumière blanche, ou de lumière solaire, n'ont pas la même réfrangibilité. Les incidences qui correspondent aux rayons efficaces de chaque couleur simple ne sont donc pas les mêmes : il résulte de là qu'en sortant de la sphère liquide, le faisceau incident se trouvera divisé en autant de faisceaux séparés qu'il y a de couleurs dans le spectre. En calculant les angles d'incidence pour les rayons efficaces des couleurs simples extrêmes, le violet et le rouge, on trouve, après une seule réflexion intérieure :

Pour les rayons violets, un angle d'incidence de 58° 40′;

Pour les rayons rouges, un angle d'incidence de 59° 23′. Et alors, les angles que les rayons émergents font avec la direction des rayons incidents sont de 40° 17′ pour les rayons violets, de 42° 2′ pour les rayons rouges.

Dans le cas de deux réflexions intérieures, en A et B, les angles d'incidence des rayons efficaces sont :

Pour le violet, 71° 26′; pour le rouge, 71° 50′; et les déviations subies par les rayons, après leur émergence de la sphère liquide, sont de 50° 59′ pour les rayons rouges, et de 54° 9′ pour les rayons violets.

On peut, à l'aide de ces données, faire voir que l'arc-en-ciel

goutte en des points voisins de ceux-là, sortiront de la goutte sensiblement parallèles les uns aux autres. Ceux qui en sont de plus en plus éloignés éprouveront des changements de direction de plus en plus variables et les rayons émergents formeront des systèmes de plus en plus divergents. Dès lors la lumière sera plus accumulée, plus vive, dans toute la partie de l'espace recevant les rayons émergents qui ont éprouvé un changement de direction minimum.

principal est produit par les rayons solaires qui ont subi une seule réflexion à l'intérieur des sphères liquides composant les gouttes de pluie. L'arc-en-ciel extérieur est produit par les rayons qui ont éprouvé deux réflexions successives. Soit OZ une ligne parallèle à la direction des rayons solaires, et passant par l'œil de l'observateur qui lui-même tourne le dos au Soleil. En regardant dans la direction O*a*, telle que l'angle *a*OZ soit celui de la déviation correspondant aux rayons violets efficaces, l'observateur recevra dans l'œil un rayon violet provenant du rayon solaire S*a* qui s'est réfléchi une fois dans les gouttes de pluie quand elles passent successivement dans leur chute par le point *a*. En effet, le parallélisme des lignes OZ et S*a* conduit à l'égalité des angles S*a*O et *a*OZ ; or ce dernier est par hypothèse égal à l'angle de déviation qui correspond aux rayons efficaces violets. Le rayon S*a* trouvera donc une goutte de pluie dont la position sera celle qui convient à l'incidence et à l'émergence calculées : l'œil verra un point violet. Environ 2 degrés plus haut, en *b*, il verra un point rouge, et dans l'intervalle *ab* toutes les nuances du spectre comprises entre le rouge et le violet, c'est-à-dire l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo. Mais évidemment la même chose aura lieu pour toute direction faisant avec OZ les mêmes angles que celles dont il vient d'être question. L'observateur verra donc des bandes de toutes ces couleurs, se projetant sur le ciel sous la forme de cercles concentriques ayant

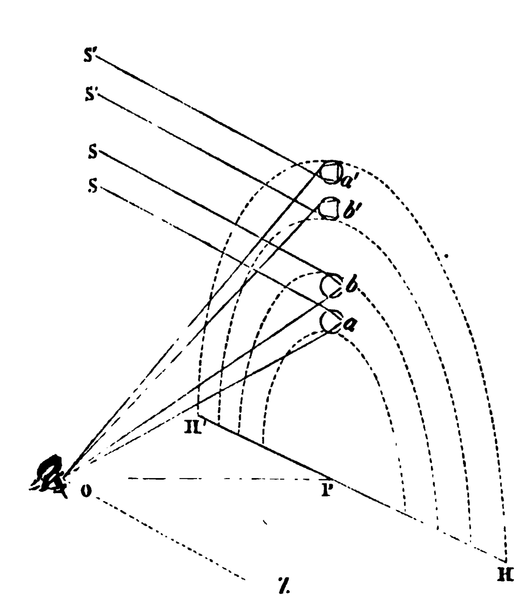


Fig. 242. — Théorie de l'arc-en-ciel; arc principal et arc secondaire.

leur centre sur la ligne OZ, en un point diamétralement opposé au Soleil. Voilà pour les rayons solaires qui pénètrent dans les gouttes de pluie et en sortent après une réflexion unique. Ceux qui ont subi deux réflexions arriveront dans l'œil en formant avec la ligne OZ des angles de 50°59′ si ce sont des rayons rouges, de 54°9′ si ce sont des rayons violets. Les rayons efficaces des couleurs intermédiaires seront compris entre ces rayons extrêmes. Mais on voit qu'ici c'est le rouge qui est à l'intérieur, et le violet à l'extérieur.

Tous ces résultats se déduisent du calcul, d'après les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière, et étant donné l'indice de réfraction de l'eau. Or les dimensions angulaires de chaque arc-en-ciel, la largeur des zones, celle de l'intervalle qui les sépare, sont autant de conséquences des données qui précèdent, et si la théorie est exacte, l'observation doit permettre d'en vérifier la justesse. C'est en effet ce que Newton et tous les observateurs qui ont après lui étudié l'arc-en-ciel ont constaté. Quand le Soleil est à l'horizon, la ligne OZ est dans ce plan. Le centre des arcs est donc lui-même à l'horizon et l'arc-en-ciel se montre sous la forme d'un demi-cercle ; c'est la forme qu'il présente en effet, soit au lever, soit au coucher du Soleil, à l'observateur situé en plaine. Pour des hauteurs différentes de l'astre, l'arc-en-ciel a une amplitude moindre qu'une demi-circonférence, et d'autant moindre qu'il est plus élevé. Enfin, si l'observateur était situé sur une montagne très-haute, et sur un pic étroit, il pourrait voir plus d'une demi-circonférence, et même un cercle complet, si la pluie tombe à une distance peu considérable.

La théorie démontre qu'il peut y avoir des rayons efficaces correspondant à 3, 4, 5 réflexions successives. On devrait donc pouvoir observer simultanément plus de deux arcs-en-ciel. Le troisième et le quatrième se verraient du côté du Soleil avec des diamètres de 39° et de 45°. Le cinquième arc-en-ciel s'observerait comme ceux que nous avons décrits, à l'opposé du Soleil.

Il ne paraît pas qu'on ait pu observer aucun de ces phénomènes indiqués par la théorie : ce qui s'explique sans doute par l'affaiblissement considérable que subit la lumière au delà de deux réflexions successives.

Si la lumière directe du Soleil produit un ou deux arcs-en-ciel concentriques, le même phénomène peut être produit par la lumière solaire réfléchie. Une nappe d'eau tranquille, un lac, la surface de la mer, en donnant une image vive du Soleil, ont permis d'observer deux ou quatre arcs, qui, ayant des centres différents sur une même verticale, se couperont donc deux à deux, les arcs dus au Soleil réfléchi étant naturellement plus élevés que les autres.

Il ne faut pas oublier que l'arc-en-ciel est un phénomène dont la production dépend uniquement de la position de l'observateur relativement au Soleil et à la nuée qui se résout en pluie; si l'observateur se déplace, l'arc-en-ciel se déplace lui-même. Dès lors, si deux personnes éloignées l'une de l'autre voient en même temps un arc-en-ciel, ce n'est pas le même arc qu'elles observent. S'il en était ainsi, celle qui se trouverait située obliquement, le verrait en perspective, sous la forme d'un ovale ou d'une ellipse, non d'un cercle. La théorie et l'observation s'accordent à prouver l'impossibilité du fait que nous venons de supposer. Maintes fois nous avons entendu des personnes, à qui nous citions l'observation d'un arc-en-ciel, répondre qu'elles aussi l'avaient vu. Ces personnes se trompaient, à moins qu'elles ne se fussent précisément trouvées dans le voisinage immédiat de la position où nous étions nous-même au même instant.

Quand l'arc-en-ciel ordinaire est très éclatant, on observe parfois des bandes colorées, soit au dedans de l'arc intérieur, soit en dehors de l'arc extérieur. On les nomme *arcs-en-ciel surnuméraires*. Young, Arago, Babinet, Airy en ont donné la théorie, qui, comme celle des *couronnes*, se rattache à la diffraction de la lumière.

§ 4. HALOS SOLAIRES. — PARHÉLIES, PARASÉLÈNES.

Dans les contrées polaires et plus rarement dans les zones tempérées, on observe quelquefois un phénomène optique assez compliqué, un assemblage régulier de cercles lumineux, d'arcs tangents à ces cercles, se distribuant autour du Soleil comme centre, et présentant le plus souvent, comme l'arc-en-ciel, les couleurs variées du prisme.

On donne le nom de *halos*, de *parhélies*, à ces phénomènes, que les figures 243 et 244 vont nous permettre de décrire avec plus de détails.

Autour du Soleil, on aperçoit deux cercles concentriques; le plus petit, qu'on nomme le *petit halo* ou *halo intérieur*, a un rayon d'environ 22° à 23°; le plus grand, ou *halo extérieur*, est de dimension presque exactement double, c'est-à-dire mesure 46° de rayon. L'un et l'autre, assez diffus sur leur contour, brillent des couleurs de l'arc-en-ciel, mais pour tous les deux le rouge est en dedans, et le violet à l'extérieur. Le halo de 46° offre en général des couleurs plus tranchées que l'autre. Un troisième cercle, parallèle à l'horizon dont il fait le tour, coupe les deux premiers en passant par leur centre : c'est ce qu'on nomme le *cercle parhélique*. Il diffère des deux halos en ce qu'il n'est pas coloré ; sa lumière est d'un blanc diffus. Vu dans leur voisinage, le cercle parhélique semble un diamètre rectiligne et prolongé des deux premiers. Il les coupe en quatre points, où se voient des apparences plus lumineuses, et comme des images diffuses du Soleil, colorées comme les halos et rouges comme eux du côté du centre. Ces *parhélies* ou *faux soleils* se montrent plus souvent à l'intersection du halos intérieur et du cercle parhélique ; ils sont plus rares et de couleurs plus faibles sur le halos extérieur.

En outre, on voit quelquefois des arcs tangents aux extrémités supérieures du diamètre vertical commun aux deux halos. Ces arcs ont le zénith pour pôle, et par conséquent sont parallèles à

l'horizon comme le cercle parhélique. Ils sont colorés comme les deux halos. Enfin, il arrive parfois que d'autres arcs tan-

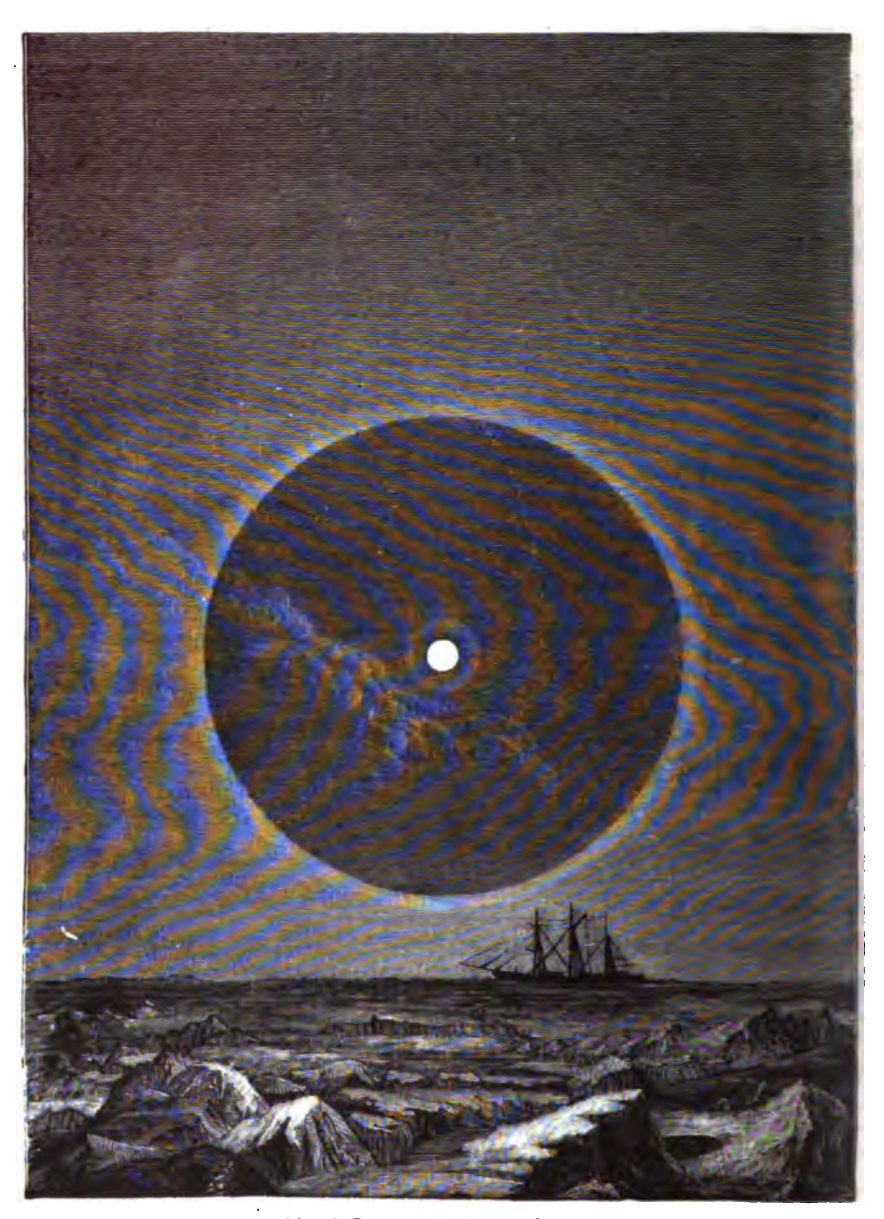


Fig. 245. — Halo simple, de 42°.

gents se voient latéralement de chaque côté de la partie inférieure du halo de 46°; mais ces arcs latéraux sont extrêmement rares.



observé par Hoff et Kries à Gotha, le 12 mai 1824; un autre fut vu en Norvège le 27 mars 1826, par Schult, Hansteen et Segelke; enfin le 4 octobre 1839, Bravais et Ch. Martins observèrent et décrivirent un halo solaire à Piteo en Suède.

Il nous reste à donner sommairement l'explication physique de ces phénomènes singuliers. Huygens a tenté le premier de donner la théorie du halo : il le supposait dû à la présence dans l'atmosphère de globules ou de cylindres de glace opaque entourés d'une couche d'eau transparente. Mariotte et Venturi, vers le milieu du siècle dernier, l'expliquèrent par la réfraction de la lumière dans les cristaux de neige ou de glace flottant dans l'air, cristaux qui existent en effet, et affectent généralement la forme prismatique hexagonale. Brewster, Arago, Frauenhofer, et enfin notre compatriote Bravais ont repris et complété la théorie de Mariotte, qui suffit à expliquer toutes les circonstances du phénomène.

Voyons d'abord comment elle rend compte du halo intérieur de 22°. L'atmosphère, entre le Soleil et l'œil de l'observateur, est parsemée d'une multitude d'aiguilles prismatiques, que nous supposerons orientées dans toutes les directions. Deux faces latérales contiguës d'un de ces prismes font entre elles un angle de 120°, angle trop grand pour qu'aucun rayon de lumière puisse les traverser successivement, puisqu'un rayon qui pénètrerait par l'une d'elles et tomberait à l'intérieur sur la seconde y subirait la réflexion totale; mais il n'en est pas de même de deux faces séparées par une troisième, parce qu'alors l'angle n'est plus que de 60°. La lumière qui pénètrera dans le prisme par l'une de ces faces et sortira par l'autre aura subi une déviation qui est au moins égale à 21° 50′ (soit 22°), angle de déviation minimum pour un prisme de glace dont l'angle est de 60°.

Parmi toutes les aiguilles prismatiques orientées de toutes les manières, considérons celles dont l'axe est perpendiculaire à un plan quelconque passant par le Soleil et par l'œil de l'observateur; elles enverront de la lumière réfractée venant de tous

les sens dans ce plan. Mais dans l'une de ces directions la lumière sera plus intense que dans toutes les autres : c'est celle qui correspondra aux prismes orientés de façon à donner la déviation minimum, et il en sera ainsi pour deux raisons. La première, c'est que les prismes ainsi disposés peuvent tourner légèrement sur leur axe sans que la déviation soit sensiblement modifiée : ce qui revient à supposer que les prismes orientés de cette façon sont plus nombreux que les autres. De plus, pendant le mouvement de rotation des autres prismes, les rayons réfractés qu'ils envoient dans l'œil ne font que passer très rapidement, tandis que les rayons réfractés au moment de la déviation minimum se succèdent plus nombreux sans cesser de passer par l'œil. Tous les rayons, qui, après leur réfraction dans les aiguilles de glace, viennent frapper l'œil après avoir éprouvé la déviation minimum, sont ceux qu'on nomme les ***rayons efficaces***, parce que seuls ils déterminent la production des cercles lumineux colorés qui constituent les halos. Le même raisonnement s'applique à tous les plans menés par le Soleil et par l'œil de l'observateur, de sorte que tous les rayons efficaces formeront un cône, dont l'axe sera la ligne joignant l'œil au Soleil.

Ainsi donc un cercle lumineux se verra autour du Soleil à une distance angulaire égale à celle qui mesure l'angle de déviation minimum pour des prismes de 60°, c'est-à-dire à 22° de distance : c'est le *halo intérieur*.

Quant à la coloration du cercle, elle s'explique avec la même facilité. En effet, l'indice de réfraction va, comme on sait, en croissant du rouge au violet. Les rayons solaires, décomposés par la réfraction prismatique, n'ont donc pas le même angle de déviation minimum; cet angle croît avec la réfrangibilité des rayons. Dès lors le cercle rouge sera enveloppé par des cercles jaune, vert, bleu, etc., dont l'ensemble constituera le petit halo ou halo intérieur.

Quant au halo extérieur ou de 46°, il est produit par la réfraction des rayons solaires qui traversent les prismes de

glace en passant d'une face latérale à l'un des hexagones de base. L'angle de ces faces étant de 90°, la déviation minimum est de 45°44′ pour les rayons moyens. De là un cercle dont le rayon ou la distance angulaire au Soleil est de 46° environ : c'est le *halo extérieur*.

DEUXIÈME PARTIE

OPTIQUE — APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LOIS DE LA LUMIÈRE

CHAPITRE PREMIER

LES MIROIRS ET LES INSTRUMENTS DE RÉFLEXION

§ 1. LES MIROIRS.

L'usage des miroirs est fort ancien. Sans remonter au temps de Moïse, et au passage de l'*Exode* où il est question des miroirs des femmes qui se tenaient à l'entrée du tabernacle, on trouve des miroirs métalliques chez les anciens Égyptiens (fig. 245). En Grèce, à Rome, on ornait les murs des appartements de plaques polies et réfléchissantes en acier, en argent, en or, en obsidienne, en pierre spéculaire : il paraît même, si l'on en juge par divers passages de Pline et d'Aristote, que les miroirs en verre doublé d'une feuille de métal poli n'étaient point inconnus des Anciens.

Mais il faut arriver jusqu'au quinzième siècle pour voir substituer aux miroirs de métal poli les glaces de verre étamé : c'est en Flandre, puis à Venise, qui devint si célèbre par sa supériorité dans ce genre d'industrie, que furent fabriqués les

premiers miroirs en verre. Ils eurent longtemps des dimensions fort petites, l'art du coulage des grandes pièces ne datant que de la fin du dix-septième siècle, époque où fut fondée la fameuse manufacture de Saint-Gobain[1]. On sait aujourd'hui combien ces objets sont répandus et combien l'usage en est devenu général, soit pour la toilette, soit pour l'ornementation intérieure et même extérieure. Si les miroirs et les glaces en verre ont l'inconvénient d'une grande fragilité, ils ont sur les mêmes objets métalliques une supériorité immense, celle d'être à peu près inaltérables, tandis que les premiers s'oxydent, se ternissent et exigent un entretien coûteux.



Fig. 245. — Miroirs des anciens Égyptiens.

Aujourd'hui, les manufactures de glaces fournissent des verres d'une dimension très grande et d'une perfection de polissage qui ne le cède en rien à la beauté de la substance transparente elle-même. Plus cette substance est blanche ou plutôt incolore, plus la glace est parfaite, parce qu'alors les rayons lumineux, qui ont à traverser deux fois son épaisseur pour revenir à l'œil, après s'être réfléchis sur la surface polie de l'étamage, ne changent point de teinte et sont très peu affaiblis par ce double passage. Un mot sur la surface réfléchissante des glaces ou miroirs *étamés*, surface qui n'est pas le verre, comme on sait, mais une mince feuille d'un amalgame d'étain, que l'on

1. Voir, sur ce point, *la Verrerie* de M. Sauzay, dans la *Bibliothèque des merveilles*.

applique sur la face postérieure de la glace. Voici comment se fait cette opération. Sur une table en pierre bien aplanie, entourée de rigoles, on étale la feuille d'étain, qu'on recouvre d'un bain de mercure. La glace bien nettoyée est glissée alors sur la couche du mercure, de manière à chasser l'excès de métal liquide; puis on détermine, à l'aide de poids, l'adhérence du verre avec la combinaison des deux lames métalliques amalgamées.



Fig. 246. — Miroir de Venise.

L'étamage par le mercure est pernicieux pour la santé des ouvriers qui exécutent ce travail; on a essayé d'y substituer l'argenture, qu'on produit en versant sur la surface de la glace un composé de nitrate d'argent, d'ammoniaque et d'acide tartrique. L'argent a, comme l'amalgame d'étain, un pouvoir réfléchissant considérable, mais la teinte des images est légèrement jaunâtre.

On emploie beaucoup, en Belgique et dans d'autres pays du Nord (l'usage en a passé en France), des miroirs qu'on place extérieurement aux fenêtres des appartements, et qui, mobiles autour d'une charnière, se disposent au gré de chacun, de manière à renvoyer à l'intérieur l'image de ce qui se passe au dehors. Ces miroirs, qui servent aussi aux marchands pour surveiller, de l'intérieur des magasins, leurs étalages, sont connus sous le nom d'*espions*.



Fig. 247. — Miroir extérieur ou espion.

De grands miroirs étamés ou métalliques (fig. 248) servent aussi à renvoyer la lumière du ciel à l'intérieur d'un appartement, qui, sans cela, resterait obscur. On emploie fréquemment ces réflecteurs dans les rues étroites et sombres des grandes villes.

Quand la réflexion de la lumière se fait sur une surface polie, mais transparente, les images se produisent encore, mais elles sont très affaiblies, une grande partie de la lumière incidente traversant la substance. Voilà pourquoi les miroirs et les glaces ordinaires sont étamés sur leur face postérieure, et alors les images se font comme sur un corps opaque d'un grand poli. Mais les glaces sans tain peuvent être employées et donner des images très colorées et très brillantes, quand les objets qu'elles reflètent sont vivement éclairés, et qu'en même temps l'espace



LES SPECTRES AU THÉATRE.

qui les entoure, plongé dans une obscurité relative, reçoit peu ou point de lumière diffuse. Tel est le principe des apparitions fantastiques connues au théâtre sous le nom de *spectres* (pl. XIV), et qu'on a, récemment encore, utilisées avec succès dans les drames.

La salle où se trouvent les spectateurs est plongée dans l'obscurité, et la scène, séparée de la salle par une glace sans tain, est faiblement éclairée, de sorte que la glace est tout à fait invisible. En donnant à celle-ci une position inclinée (fig. 249), elle réfléchit l'image d'un personnage, image vivement éclairée par une lumière projetée sur ce dernier et placée sous la scène, dans ce que l'on nomme, en style de théâtre, le premier dessous. L'acteur réel que le spectateur voit directement sur la scène et l'image virtuelle, mais animée, du personnage, peuvent ainsi se mêler, se confondre, de façon à faire illusion aux spectateurs, et à leur faire croire à l'apparition d'un fantôme immatériel et insaisissable. La nécessité de donner à la glace une position inclinée fait que le fantôme ne paraît pas parfaitement en équilibre, et ce défaut est surtout sensible pour les spectateurs placés sur les côtés.

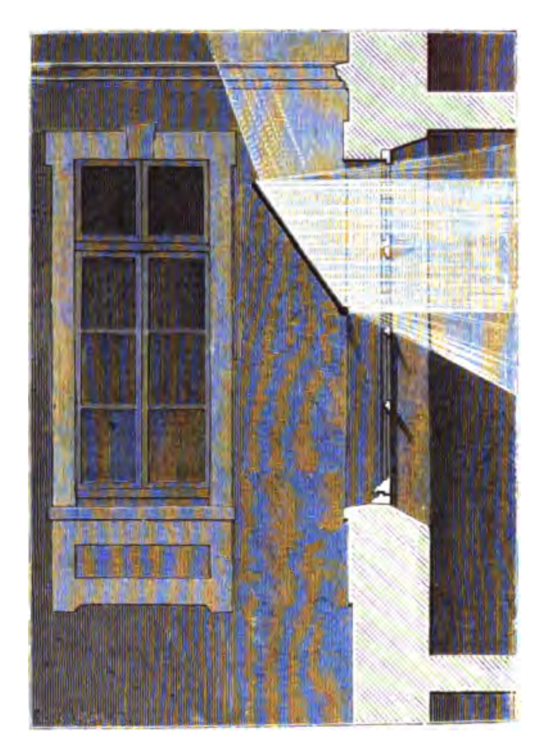


Fig. 248. — Réflecteur.

Avant de décrire les instruments scientifiques fondés sur le phénomène de la réflexion à la surface des miroirs plans, men-

tionnons une application intéressante et facile des lois de la réflexion. Elle a pour objet la mesure des hauteurs verticales des objets : arbres, maisons, édifices, etc. On place sur le sol,

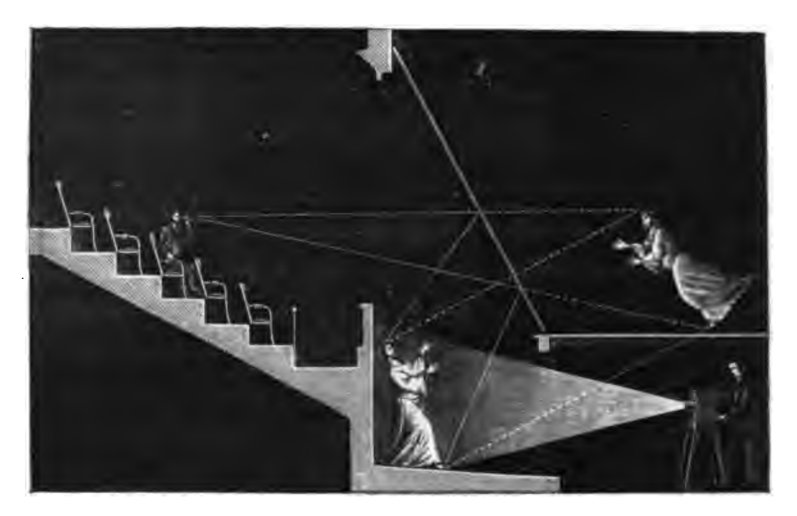


Fig. 249. — Disposition de la glace sans tain et position du fantôme.

dans une position bien horizontale, un petit miroir plan, entre l'objet à mesurer et l'œil. Puis on s'éloigne dans la direction de la ligne qui joint le pied de l'objet au miroir, jusqu'à ce qu'on aperçoive sur ce dernier l'image A′ du sommet A. A ce moment, il est facile de comprendre que le rapport de la hauteur de l'œil au-dessus du plan en *b*, et de la hauteur du sommet A de l'arbre, est précisément celui de la distance horizontale *b*O à la distance horizontale du pied de l'arbre en O. Un calcul facile donne donc la hauteur cherchée. Une flaque d'eau non agitée par le vent produirait le même effet que le morceau de glace, avec une certitude de plus, celle de la parfaite horizontalité de la surface réfléchissante.

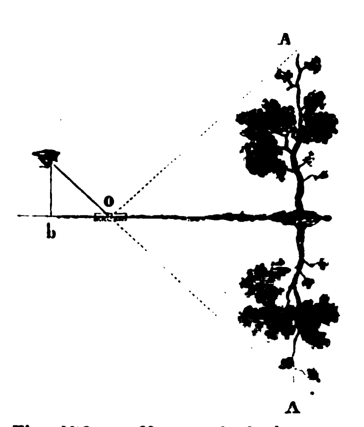


Fig. 250. — Mesure de la hauteur verticale d'un objet.

Nous avons décrit, dans la *Première partie* de LA LUMIÈRE,

diverses applications ingénieuses, amusantes ou utiles, de la réflexion sur les miroirs plans, combinés entre eux de plusieurs manières; de ce genre sont la *lunette magique*, le *polémoscope*, le *kaléidoscope :* nous y renverrons donc le lecteur.

§ 2. LES MIROIRS MAGIQUES.

Il a été fréquemment question, dans ces derniers temps, d'une sorte de miroirs auxquels on a donné le nom de *miroirs magiques,* parce qu'ils présentent un phénomène singulier, au premier abord merveilleux. Voici comment M. Bertin, dans une conférence faite sur ce sujet à la Sorbonne, décrit cette sorte de miroirs : « Les peuples de l'extrême Orient, les Chinois et les Japonais, ne connaissaient pas autrefois d'autres miroirs que les miroirs métalliques, et même aujourd'hui ils n'en fabriquent pas d'autres. Cet objet de toilette est en bronze, de formes et de grandeurs diverses, mais toujours portatif. L'une des faces est polie et toujours un peu convexe, de sorte que les images sont rapetissées; l'autre face est plane ou légèrement concave, et elle est toujours ornée de figures en relief, venues à la fonte, d'un travail plus ou moins parfait (fig. 251). Parmi ces miroirs, il en est un très petit nombre qui tirent de leur fabrication une propriété merveilleuse : lorsqu'un rayon de soleil tombe sur la surface polie, s'il est réfléchi contre un écran blanc, il transporte sur cet écran l'image des ornements qui sont sur la face postérieure. Au Japon, d'où nous viennent maintenant ces miroirs, ni le fabricant qui les fait, ni le marchand qui les vend, ne se doutent de leurs propriétés; mais



Fig. 251. — Miroir magique japonais (dessins en relief).

les Chinois les connaissent depuis longtemps et les apprécient; ils les appellent d'un nom qui signifie « *miroirs qui se laissent traverser par la lumière* (theou-kouang-kien) ». Nous les appelons *miroirs magiques*.

Dès 1844, Arago présentait à l'Académie des sciences un de ces miroirs, dont Brewster avait proposé douze ans auparavant une théorie, mais sans avoir eu l'objet en sa possession et dès lors sans avoir pu faire aucune expérience. En 1847, un physicien français, Person, donna la véritable explication du phénomène. Nous allons la résumer brièvement, en indiquant d'abord comment on dispose l'expérience elle-même.

On peut employer simplement la lumière solaire, présenter aux rayons du Soleil la surface polie du miroir, et recevoir le faisceau réfléchi sur un écran blanc placé à une distance d'un mètre environ. L'effet est plus intense, si l'on éclaire le miroir par de la lumière divergente; le faisceau est dilaté, puisque la surface du miroir est légèrement convexe; on peut le recevoir sur l'écran à une plus grande distance : alors l'image du miroir s'y dessine (fig. 252), et l'on aperçoit avec étonnement les détails des ornements en relief de la face postérieure du miroir, de celle qui n'est pas éclairée : ces détails paraissent plus lumineux que le fond du miroir.

Un ancien auteur chinois (du douzième siècle) avait imaginé l'explication suivante du phénomène. Il supposait que les reliefs du revers du miroir s'étaient reproduits en creux sur l'autre face au moment du coulage; que dans ces tailles on avait introduit un bronze plus fin que celui du miroir, et qu'on avait ensuite poli la surface. Le phénomène aurait été produit par l'inégalité du pouvoir réfléchissant des deux bronzes. C'est à peu près cette explication qu'avait proposée Brewster, mais elle a été depuis reconnue inadmissible, puisque la surface du miroir est amalgamée.

Voici la vraie théorie des miroirs magiques.

Person reconnut que la surface polie du miroir n'était pas régulièrement convexe, que cette régularité n'existait que sur

les parties correspondant aux creux du revers du miroir. Les parties de cette surface qui correspondent aux reliefs, c'est-à-dire aux contours des dessins du revers, sont planes. Il résulte de là que les rayons du faisceau de lumière qui tombent sur les parties convexes, vont en divergeant former une image affaiblie et relativement sombre du miroir. Les rayons du faisceau qui se réfléchissent sur les parties planes sont renvoyés parallèlement et les images qu'ils forment sur l'écran sont plus lumineuses que celles du fond du miroir. On comprend ainsi que les dessins se voient en blanc sur l'écran.

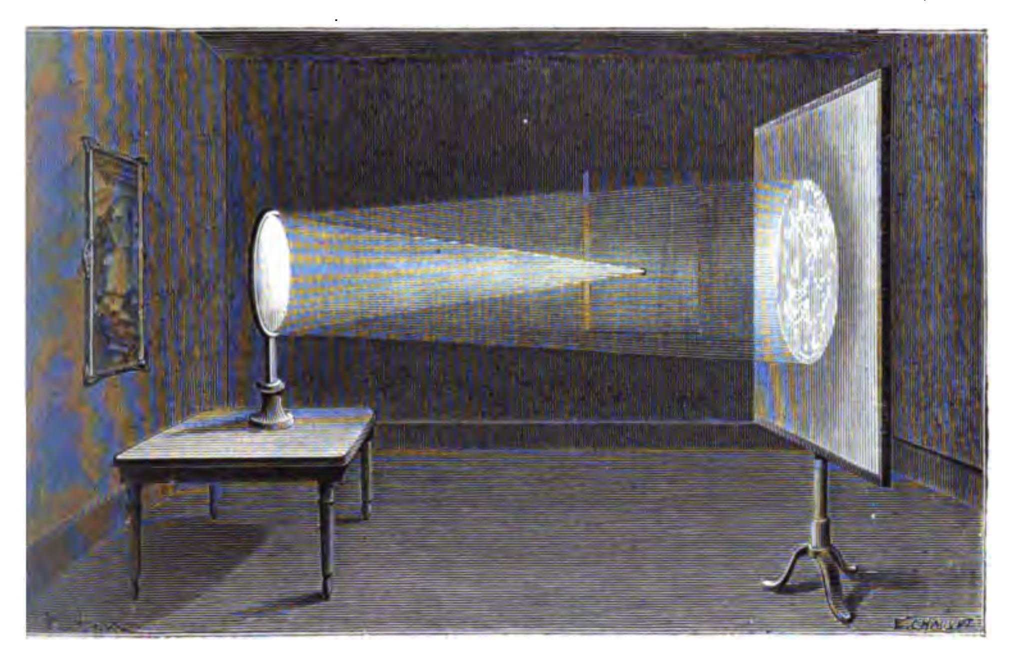


Fig. 252. — Expérience faite avec un miroir magique.

Quant à l'irrégularité de forme dont il s'agit, elle provient du mode de fabrication et de polissage des miroirs. D'après M. Ayrton, savant anglais professeur à l'École des ingénieurs de Yeddo, voici comment procèdent les fabricants de miroirs japonais : « Sorti de la fonte sous la forme d'un disque plan, le miroir, avant d'être poli, est d'abord rayé dans tous les sens avec un outil pointu, et naturellement il lui offre plus de résistance dans les parties épaisses que dans les parties minces.

Cette opération le rend d'abord légèrement concave, et c'est par la réaction élastique du métal qu'il devient convexe ; la convexité est plus sensible dans les parties minces que dans celles qui correspondent aux reliefs du dessin. » Des expériences nouvelles faites par M. Govi en Italie, par MM. Bertin et Duboscq en France, ont entièrement confirmé l'explication que Person proposait dès 1847. Elles ont montré en outre qu'on peut accroître l'inégalité de courbure qui donne lieu au phénomène, en soumettant la face postérieure du miroir à une température élevée, ou, ce qui donne le même résultat, à une forte pression. Lorsqu'on chauffe le miroir par derrière, les parties minces s'échauffent plus rapidement que les plus épaisses ; la pression produit le même effet ; dans les deux cas, les inégalités de la surface réfléchissante du miroir se trouvent accentuées, et l'effet magique est augmenté.

§ 3. LE SEXTANT.

On appelait autrefois *octant* ou *quartier de réflexion* l'instrument que nous allons décrire et qui sert aux marins à prendre les hauteurs des astres ou les distances angulaires de la Lune et des étoiles entre elles.

L'invention en est due à Hadley (1731), mais plusieurs savants, entre autres Newton, Hooke, Thomas Godfrey de Philadelphie, Harris, ont eu l'idée d'un instrument semblable, fondé sur le même principe. Hadley est toutefois le premier qui l'ait fait construire et qui en ait démontré la grande utilité.

Le sextant est une application d'un principe fort simple de géométrie et de physique, qui est lui-même une conséquence immédiate des lois de la réflexion des rayons lumineux[1].

Quand un rayon de lumière a subi, pour arriver à l'œil, deux réflexions successives sur deux miroirs plans, l'angle de déviation de ce rayon est rigoureusement double de l'angle des deux miroirs.

1. Nous avons eu déjà l'occasion d'utiliser ce principe, en exposant le procédé imaginé par Léon Foucault pour la mesure de la vitesse de la lumière.

Soit SI un rayon lumineux venant d'une source de lumière, d'une étoile par exemple ; il tombe en I sur le miroir M, s'y réfléchit, suit la direction II' et tombe sur un second miroir N ; là il se réfléchit une seconde fois, suit la nouvelle direction I'O et va tomber dans l'œil.

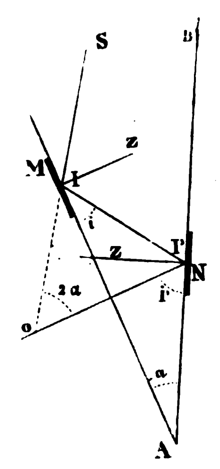


Fig. 253. — Principe théorique du sextant.

L'angle SOI' est le double de l'angle α que font entre eux les deux miroirs[1].

Voici maintenant la description du sextant, tel qu'on le construit aujourd'hui :

Il se compose d'un secteur circulaire dont l'arc, divisé avec soin, mesure environ 60 degrés (de là son nom de *sextant;* autrefois il ne portait que 45 degrés, ou le huitième de la circonférence, d'où son nom primitif d'*octant*) ; celui que représente la figure 254 porte 85 degrés. L'arc découpé sur une plaque de métal assez

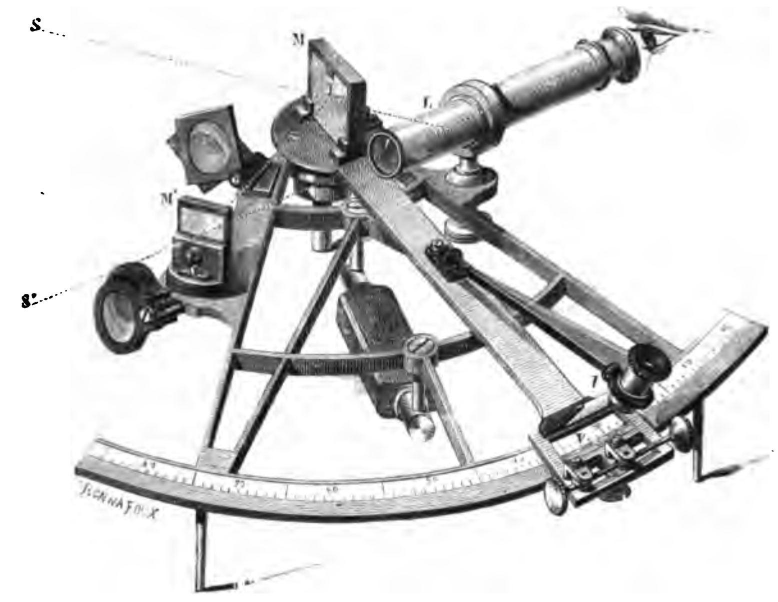


Fig. 254. — Le sextant.

épaisse est solidement relié au centre du secteur, sur lequel

1. La démonstration de cette proposition est des plus simples : l'angle en O, en effet, est

peut tourner une plate-forme munie d'une alidade mobile, portant elle-même un vernier V, qui permet de lire les fractions de degré sur le limbe : *l* est une petite loupe servant à ce dernier usage. Un miroir étamé M est fixé normalement au centre du secteur et dans le prolongement de la ligne du zéro de l'alidade mobile ou du vernier. Il est donc mobile avec cette alidade. Un second miroir fixe M′ est porté sur l'un des côtés du secteur dans une direction exactement parallèle au rayon qui aboutit au zéro des divisions de l'arc : ce second miroir n'est étamé que sur sa moitié inférieure, il est transparent sur l'autre moitié.

Une lunette L fixée au rayon opposé du secteur permet de voir à son foyer, par transparence, un point situé dans la direction LS′ et par réflexion un autre point lumineux doublement réfléchi en I sur le premier miroir, en I′ sur le second. Quand la coïncidence de ces deux images a lieu, il est clair que l'angle des rayons lumineux SI, S′ I′ est double de l'angle des deux miroirs, d'après le principe posé plus haut. Or l'angle des deux miroirs est précisément alors celui que fait l'alidade mobile avec le zéro du sextant.

On va comprendre maintenant avec facilité comment on se sert de l'instrument.

L'observateur le prend par sa poignée de la main gauche; puis, mettant l'œil à l'oculaire de la lunette, il vise l'un des objets, une étoile par exemple, à travers la partie non étamée du petit miroir. Il fait pivoter alors le sextant autour de la ligne de visée jusqu'à ce que l'autre étoile soit dans le plan du secteur. Alors, faisant tourner l'alidade et le grand miroir, il amène l'image de la seconde étoile, après deux réflexions successives, en coïncidence avec celle de la première, au centre du champ de la lunette.

« Le sextant peut servir non seulement aux observations de hauteur, mais encore à la mesure de la distance angulaire de

égal à la différence des angles SII′ et II′O, c'est-à-dire à $2(90^\circ - i) - 2(90^\circ - i') = 2(i' - i)$. D'autre part, l'angle α est égal à la différence des angles II′B (extérieur au triangle II′A) et I′IA, c'est-à-dire $= i' - i$; l'angle des deux miroirs est donc moitié de l'angle de déviation.

ɪn quelconque relativement à
'lation n'est nécessaire, les
ˋ main ; aussi l'emploie-t-on
ətte propriété précieuse de
ont on cherche la distance
'e comme s'ils ne faisaient
ʒré tous les mouvements
ɪvec lui que se font au-



e observant avec

ène l'image
de l'étoile.
'image du
ɪais alors
e miroir
'es sont
ɔrment
ɪce de

celle
əur,

on tient le sextant verticalement, de façon que l'astre soit dans son plan, et l'on vise directement avec la lunette l'horizon formé par la surface même de la mer. Si cet horizon manque, on emploie un horizon artificiel, soit un bain de mercure, soit une glace polie placée horizontalement à l'aide de trois vis calantes.

§ 4. LES GONIOMÈTRES.

Il existe, comme on sait, dans la nature un grand nombre de corps qui ont une forme géométrique définie, le plus souvent terminés par des faces planes et polies, diversement assemblées. Ce sont les cristaux. Les minéralogistes qui trouvent les cristaux tout formés dans les roches, les chimistes qui les obtiennent par divers procédés, ont un égal besoin, pour les définir, de connaître avec précision les angles des faces d'un même cristal. Ils y parviennent à l'aide d'instruments qu'on nomme *goniomètres* (de γωνία angle, et μέτρον mesure), et qui sont généralement basés sur le même principe, celui des lois de la réflexion des rayons lumineux. Le plus souvent, en effet, les faces des cristaux ont un pouvoir réfléchissant assez grand pour qu'on puisse considérer et employer chacune d'elles comme un miroir plan.

Les goniomètres de réflexion sont assez nombreux. Nous nous bornerons à décrire deux des plus employés, le goniomètre de Wollaston et le goniomètre de Babinet, inventés par chacun de ces deux célèbres physiciens.

Le goniomètre de Wollaston se compose des pièces suivantes :

1° D est un limbe vertical divisé en degrés sur sa tranche et mobile sur un axe horizontal, qu'on fait tourner à volonté au moyen d'une virole G. Un vernier V fixé sur le montant de l'instrument sert à indiquer l'angle dont on a fait tourner le limbe.

2° L'axe du limbe est creux ; il est traversé par une tige qui peut tourner sur elle-même, indépendamment du limbe, à l'aide

d'une virole A. Cette tige supporte une pièce articulée, qui elle-même porte une plaque métallique, susceptible de tourner en divers sens au moyen d'un bouton et des articulations. C'est sur cette plaque qu'on place le cristal dont il s'agit de mesurer un des angles.

Voici comment on procède à cette mesure.

On fait choix de deux mires horizontales parallèles, par exemple, de l'arête d'un toit de maison et d'un barreau d'une croisée du rez-de-chaussée ; ou encore on prend pour mire supérieure l'arête supérieure d'une fenêtre ouverte dont la ligne sombre se détache sur le ciel, et pour arête inférieure le rebord d'une table ou celui d'une feuille de papier posée sur cette table.

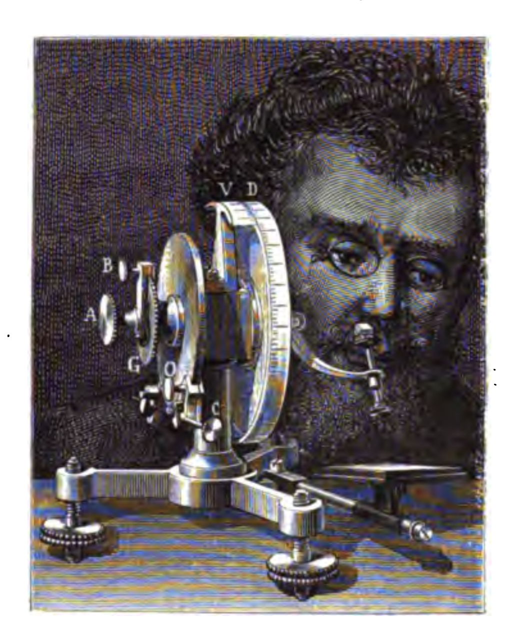


Fig. 256. — Goniomètre à réflexion de Wollaston.

Cela fait, on place le goniomètre dans une position telle, que le limbe soit bien vertical (un niveau à bulle d'air et les vis calantes du pied permettent d'obtenir ce résultat), et en même temps dans une direction perpendiculaire aux mires choisies. Alors on dispose le cristal sur la plaque de l'instrument, en l'y maintenant avec de la cire ; et il importe de le placer de façon que l'arête de l'angle à mesurer soit elle-même perpendiculaire au limbe ou parallèle à l'axe de rotation. On se sert pour cela des images des deux mires obtenues par réflexion sur les deux faces, images qui, pour chacune des faces, doivent être bien parallèles entre elles.

Une fois ces dispositions préliminaires prises, on place le zéro du limbe en coïncidence avec le zéro du vernier. Faisant

tourner alors le cristal avec la virole A, on amène l'image de la mire supérieure en coïncidence avec la mire inférieure vue directement, ou mieux encore avec l'image de la première mire réfléchie dans un petit miroir qu'on voit à droite fixé au pied de l'instrument. Puis à l'aide du bouton molleté G on tourne le limbe lui-même, et par conséquent le cristal, jusqu'à ce qu'on obtienne la même coïncidence, mais cette fois sur la seconde face du cristal. Ce dernier a pris les deux positions qu'indique la figure 257, et chaque face a tourné de l'angle α.

La lecture de l'angle de rotation du limbe donne en degrés et fractions de degré, non pas l'angle β du cristal lui-même, mais son supplément géométrique α, d'où l'on déduit le premier par un simple calcul.

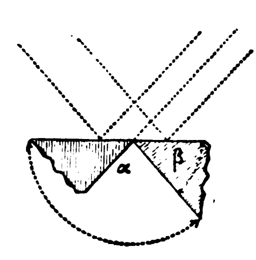


Fig. 257. — Principe géométrique du goniomètre. Angle de rotation du cristal.

Le *goniomètre de Babinet* consiste en un limbe divisé horizontal, portant un *collimateur* fixé invariablement sur un rayon du cercle : c'est une lunette portant à son foyer optique deux fils croisés. Une seconde lunette mobile peut tourner, à l'aide d'une alidade munie d'un vernier, autour du centre, ou peut être fixée dans une position quelconque au moyen d'une vis de pression. Enfin, une plate-forme, placée au centre du limbe, peut tourner autour de son axe vertical, au moyen d'une alidade, munie elle-même d'un vernier qui sert à mesurer l'angle de rotation. C'est sur cette plateforme (qui n'est autre qu'une plaque de glace bien plane et polie) que l'on pose le cristal, en ayant soin de placer l'arête de l'angle à mesurer au centre et de lui donner une position parfaitement verticale. On s'assure de cette dernière condition en vérifiant dans plusieurs directions la parfaite coïncidence des deux lignes droites qui forment l'arête du cristal et son image dans la glace.

Voyons maintenant comment on procède à la mesure de l'angle.

On fixe d'abord la lunette mobile en une position qui fait un

angle quelconque avec celle du collimateur; on amène le zéro du vernier de l'alidade vis-à-vis du zéro du limbe, et l'on tourne le support du cristal jusqu'à ce qu'on voie dans la lunette le fil micrométrique placé à son foyer coïncider avec l'image du fil du collimateur vue par réflexion sur l'une des faces du cristal.

A ce moment, on tourne de nouveau le cristal, mais cette fois à l'aide de l'alidade elle-même, jusqu'à ce que la même coïncidence ait lieu avec l'image réfléchie vue sur l'autre face du cristal.



Fig. 258. — Goniomètre à réflexion de Babinet.

L'angle de rotation, mesuré au vernier de l'alidade, est celui des deux normales aux faces réfléchissantes; de sorte qu'en calculant le supplément de cet angle, on aura celui des deux faces du cristal.

La figure 258 représente un goniomètre de Babinet monté sur un pied à genou; mais on en fabrique de plus petits et de plus simples qu'on peut tenir à la main à l'aide d'une poignée.

Le même instrument peut servir dans les recherches d'optique toutes les fois qu'on emploie des prismes dont il est nécessaire de connaître l'angle avec exactitude, par exemple dans le cas où l'on veut déterminer l'indice de réfraction de la substance dont le prisme est formé.

§ 5. LES HÉLIOSTATS.

Dans un grand nombre d'expériences d'optique, il est nécessaire de projeter, suivant une direction constante, un faisceau de lumière solaire : ce que le mouvement diurne du Soleil ne permet pas d'obtenir directement dans les expériences de

quelque durée. Si le faisceau est d'abord reçu sur un miroir plan d'où il est renvoyé, par réflexion, vers le point ou vers l'objet qu'il s'agit d'éclairer, il faut changer progressivement l'inclinaison du miroir pour conserver au faisceau réfléchi sa direction constante.

On y parvient au moyen des *porte-lumière*, appareils que nous aurons plus loin l'occasion de décrire quand il sera question du *microscope solaire* et qui consistent en un miroir susceptible de tourner à volonté autour de deux axes, l'un horizontal, l'autre vertical, si le faisceau réfléchi doit avoir lui-même une direction horizontale. Mais l'intervention de l'observateur est toujours nécessaire pour modifier, dans un sens convenable, l'orientation du miroir.

Les *héliostats* sont des appareils destinés à rendre cette intervention inutile : le miroir qui en constitue la pièce réfléchissante est mis en mouvement d'une façon continue par une horloge, et un mécanisme approprié le maintient constamment dans une inclinaison telle, que les rayons solaires réfléchis à sa surface suivent une direction constante, malgré le mouvement diurne de l'astre.

Il y a des héliostats de constructions variées : nous nous bornerons à décrire ceux qui portent les noms de Gambey, de Silbermann et de Foucault, leurs inventeurs. Mais auparavant nous ferons connaître le principe commun à tous, et sans lequel on ne pourrait comprendre leurs dispositions ni le jeu de leur mécanisme.

La ligne PP′ (fig. 259) représentant l'axe du monde, la ligne de direction invariable autour de laquelle a lieu le mouvement diurne des étoiles et du Soleil, le cercle S sera la route apparente parcourue par ce dernier astre en un jour, l'angle SOP étant la déclinaison du Soleil à l'époque considérée. En A est un cadran équatorial sur lequel l'ombre du style AO marque à chaque instant l'heure du jour. La ligne SOB indique donc le chemin suivi par un faisceau de rayons solaires ; et, si l'on conçoit que la ligne OB tourne autour du point O en suivant con-

stamment l'extrémité B du rayon AB, elle sera toute la journée la route de la lumière incidente.

Soit RR la direction suivant laquelle on veut que les rayons solaires soient constamment réfléchis, la bissectrice NN′ de l'angle SOR sera la normale au point d'incidence, ce qui détermine la position que le miroir *mm* doit occuper au moment supposé, pour que la réflexion se fasse suivant la direction voulue.

Toute la question est donc de maintenir le miroir dans une

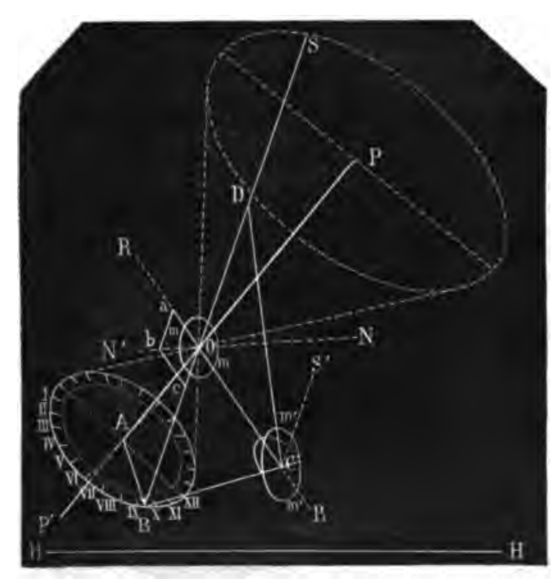


Fig. 259. — Principe géométrique des divers systèmes d'héliostats.

position relative toujours la même, par rapport à la direction constante des rayons réfléchis et à la direction variable des rayons solaires incidents. On y arrive de plusieurs manières.

1° On place au-dessous du cadran équatorial une horloge qui fait mouvoir une aiguille BA et lui fait décrire un cercle entier en vingt-quatre heures. Cette aiguille se trouve donc sans cesse dans la direction qu'occuperait précisément l'ombre du style. A son extrémité est fixée une tige BO à laquelle on donne une inclinaison, sur le cadran, égale à la déclinaison du Soleil pour le jour de l'observation. C'est là une première condition

à laquelle satisfont pareillement les divers systèmes d'héliostats.

2° La tige OB porte le miroir; elle est liée à un parallélogramme articulé O*abc*, dont la diagonale O*b* coïncide avec la bissectrice de l'angle SOR, c'est-à-dire avec la normale au point d'incidence, le côté fixe O*a* du parallélogramme étant dirigé



Fig. 260. — Héliostat de J. T. Silbermann.

suivant la direction OR qu'on veut donner au faisceau réfléchi. Tel est le système d'héliostat imaginé par J. T. Silbermann, et qu'on voit réalisé dans la figure 260.

3° Soit maintenant OC (fig. 259) une tige de longueur constante pouvant prendre autour du point O une position quelconque, celle qu'on veut donner au rayon réfléchi. Cette tige est creuse et porte une fourchette à laquelle est fixé le miroir *m'm'*, qui peut aussi tourner autour de OR et autour de AC.

Une autre tige CD, disposée dans le plan du miroir, est articulée à un anneau en D′, à l'extrémité d'une tige OD′ égale à OC. Un rayon S′C qui tombera sur le miroir parallèlement à SO sera réfléchi suivant CR. Telle est la disposition de l'héliostat de Gambey.

4° Le miroir est supporté en B par une tige verticale autour de laquelle il peut prendre toutes les directions possibles. Il



Fig. 261. — Héliostat de Léon Foucault.

est dirigé par une autre tige CB normale à sa surface et articulée en B à un anneau fixé sur OB à une distance OC = OB. Dans son plan, une troisième tige CD′ est percée d'une rainure dans laquelle on peut glisser le prolongement OD′ de OB. Les deux triangles OCD et OBC′ sont toujours isocèles, de sorte que la normale CB au miroir est parallèle à ON, bissectrice de l'angle des rayons incidents et réfléchis. C'est le principe de l'héliostat de Léon Foucault.

Ces principes posés, il est aisé de comprendre le mécanisme

des trois systèmes d'héliostats de Gambey, de Silbermann et de Foucault, dont les deux derniers sont reproduits par les figures 260 et 261.

§ 6. LE SIDÉROSTAT.

Un grave inconvénient des instruments employés dans les observatoires aux recherches d'astronomie physique, c'est que l'observateur doit se déplacer avec l'oculaire de la lunette, selon le point du ciel qu'il étudie, et avec le mouvement de rotation diurne qui entraîne ce point. De là, pour lui, des positions fort incommodes, gênantes et fatigantes, et, en somme, nuisibles à l'étude du phénomène observé.

Quand il s'agit d'observations à la lunette méridienne ou au théodolite, l'emploi d'un prisme rectangulaire, à l'intérieur duquel les rayons lumineux subissent la réflexion totale, permet de renvoyer l'image dans une direction constante : on nomme *lunette brisée* l'instrument où cette modification est apportée. Mais c'est une solution qui n'est point applicable aux équatoriaux, instruments dont l'axe se déplace uniformément autour de l'axe du monde et suit l'astre observé à mesure que l'entraîne le mouvement diurne.

C'est dans le but de remédier à cette lacune et d'éviter les inconvénients signalés plus haut que Léon Foucault a imaginé l'instrument auquel il a donné le nom de *sidérostat*[1]. Ce n'est autre chose qu'une lunette astronomique, dont l'axe optique est invariablement fixé dans une position horizontale, au devant de laquelle l'image du point du ciel qu'il s'agit d'observer est renvoyée par un miroir mû par un mouvement d'horlogerie, et susceptible de prendre à chaque instant la position variable

1. M. le commandant Laussedat, actuellement directeur des études à l'École polytechnique, a eu le premier l'idée de combiner l'héliostat avec l'emploi d'une lunette fixe horizontale pour observer et photographier les phénomènes célestes. Voyez à ce sujet les deux articles publiés par ce savant dans la *Revue scientifique* des années 1868 et 1874, où il revendique la priorité pour l'invention sinon pour la réalisation du sidérostat.

qu'exige le mouvement diurne. Tout le ciel peut donc ainsi, à la volonté de l'observateur, défiler devant la lunette qui reste immobile, et celui-ci, sans se déranger, conserve l'œil à l'oculaire de l'instrument. Le sidérostat est, par conséquent, en réalité, une espèce d'héliostat où la direction du rayon réfléchi reste constante et horizontale.

La figure 262 permet d'en saisir nettement la disposition.

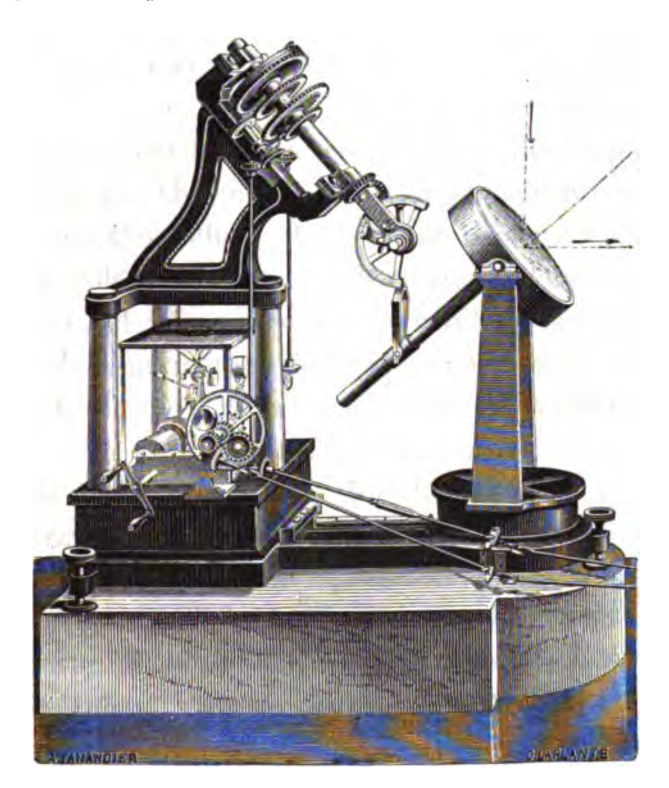


Fig. 262. — Le sidérostat.

Le miroir peut tourner autour d'un axe horizontal porté lui-même par deux montants verticaux tournant eux-mêmes sur une couronne de galets autour d'un axe vertical. Il est soutenu par une tige normale à sa surface qui glisse dans un anneau embrassé par une fourchette dont l'axe donne la direction des rayons incidents de l'astre observé. Cette fourchette est articulée, à son autre extrémité, au bout d'un axe cylindrique qui est parallèle à l'axe du monde, et qu'une série de rouages et d'en-

grenages fait tourner sur lui-même d'un mouvement uniforme avec la vitesse angulaire du mouvement diurne.

Un cercle divisé permet de fixer la direction de l'axe de la fourchette, de manière que l'angle qu'elle fait avec l'axe du monde, soit égal à la distance polaire de l'astre. L'angle horaire de ce dernier étant donné pour le moment où l'observateur doit commencer, on dispose l'instrument de manière que les rayons de l'astre viennent tomber dans le plan qui passe par l'astre et par l'axe de la lunette, et le mouvement l'y laisse ensuite pendant tout le temps de l'observation.

Il est important de remarquer que la longueur de la fourchette est précisément égale à la distance de son axe d'articulation à l'axe horizontal du miroir. Il résulte de là, en effet, que la ligne joignant les milieux des deux axes, prolongée au delà du miroir, donne la direction des rayons réfléchis. Cette direction est donc constante : on l'incline ordinairement de quelques degrés au-dessous de l'horizon, afin de pouvoir observer au besoin les astres très voisins de l'horizon.

Une des grandes difficultés de la construction du sidérostat, c'était le miroir plan, dont la surface doit être travaillée de manière à offrir une perfection géométrique aussi grande que possible. C'est en cela que consiste la différence essentielle de l'héliostat et du sidérostat. Dans l'héliostat, le principal est d'obtenir une direction constante pour les rayons réfléchis; comme c'est la lumière qu'on étudie, non la source lumineuse elle-même, il importe peu que celle-ci soit ou non déformée. Le sidérostat, au contraire, doit donner une image exacte, identique, du ciel lui-même, des astres, de leur figure, de leur mouvement. Ce problème difficile de la réalisation d'un plan optique a été résolu par Léon Foucault à l'aide d'une méthode dont cet habile et regrettable physicien a laissé tous les éléments entre les mains d'un de ses amis, M. Ad. Martin.

Voici comment M. Wolf apprécie les avantages du nouvel instrument : « Il n'est point d'observateur, dit-il, qui n'ait eu à lutter contre les difficultés que présente l'adaptation, à la

lunette d'un équatorial, d'un grand spectroscope, des chambres photographiques, des appareils de projection ou de recherches photométriques. Toutes ces difficultés disparaissent par l'emploi du sidérostat. Les instruments des cabinets de physique, quels que soient leur poids, leur volume et leur forme, viennent se placer devant le foyer de la lunette comme devant le porte-lumière de la chambre obscure. Et l'astronome étudie la lumière de tous les astres dans les mêmes conditions où le physicien a étudié la lumière solaire. Par là, bien des expériences, aujourd'hui presque inabordables, peuvent se réaliser aisément, et particulièrement celles qui exigent une stabilité parfaite de l'instrument de mesure : telles sont les déterminations des positions absolues des raies spectrales et des déplacements de ces raies, les mesures photométriques, etc.

« Le miroir du sidérostat, essayé sur le ciel avec l'excellente lunette de Cauche de 16 centimètres d'ouverture, qui appartient à l'Observatoire, et des grossissements de 100 à 300 fois, ne produit aucune déformation du faisceau provenant d'une étoile sous une incidence de plus de 45 degrés. »

La perte de la lumière occasionnée par la réflexion est faible; d'après les expériences de Foucault, elle ne s'élève pas, pour l'argent poli des miroirs, à plus des $\frac{9}{100}$ de la lumière incidente. D'ailleurs le poli dure très longtemps, et, comme la réargenture est facile, on peut remettre en état le miroir dès que la surface en est altérée pour une cause quelconque[1]. Au point de vue astronomique le sidérostat a un défaut plus grave que celui qui peut résulter de la perte de la lumière : il ne permet pas l'exploration de toutes les parties du ciel, mais seulement celles qui sont comprises entre le pôle et l'horizon du côté du sud. Pour les autres, il faudrait un sidérostat construit de façon à réfléchir les rayons au nord.

Une note de M. H. Sainte-Claire Deville, insérée dans le

1. Le sidérostat de l'Observatoire de Paris a été construit par M. Eichens, sous la direction de MM. Wolf et A. Martin. Voici une note du *Rapport annuel sur l'Observatoire* par M. l'amiral Mouchez, qui indique quel en a été l'usage en 1880 : « Le sidérostat a été employé à l'agrandissement de clichés, puis à la photographie solaire. »

volume des œuvres de Léon Foucault, indique quelles espérances avait conçues ce dernier de l'emploi futur du sidérostat, espérances qui ne devaient pas se réaliser pour l'inventeur, l'instrument n'ayant été construit qu'après sa mort. Le savant et regretté physicien commence par faire ressortir en ces termes l'utilité du sidérostat :

« La disposition habituelle des instruments astronomiques, lunettes ou télescopes, ne permet pas d'y adapter aisément les appareils nécessaires à l'étude des propriétés de la lumière des astres (photométrie, photographie, polarisation, spectroscopie). De plus, l'instabilité des équatoriaux devient très grande lorsqu'on y adapte des appareils souvent lourds et excentriques qui dérangent l'équilibre. Le sidérostat a pour but d'éviter ces inconvénients et de permettre à l'astronome d'observer la lumière exactement comme le physicien étudie la lumière du Soleil dans la chambre obscure, en employant à ces recherches des instruments qui se trouvent dans les cabinets de physique, et sans avoir à en changer ni la forme ni la disposition... Si le miroir plan reste immobile, cet appareil peut être employé comme un équatorial aux mesures des positions relatives des astres. C'est aussi le véritable instrument pour la construction des cartes célestes, et M. Wolf s'est mis en mesure d'y adapter un appareil au moyen duquel l'astronome obtiendrait immédiatement la reproduction des cartes célestes. »

Puis il ajoute, en rappelant les espérances de l'inventeur :

« Une des applications les plus intéressantes du sidérostat était celle qu'en voulait faire M. Foucault à l'étude permanente du Soleil. Dans une des salles les plus fréquentées d'un observatoire, il voulait disposer un appareil donnant sur un écran quadrillé une image fixe et amplifiée du Soleil. L'apparition et la forme de taches, le passage d'un astéroïde sur le disque solaire, auraient été un sujet d'études continuelles, faites, sans danger pour les yeux, par toutes les personnes que leurs occupations amènent sans cesse à traverser cette salle.

« Dans la photographie du Soleil, M. Foucault voulait

employer, avec le sidérostat, un objectif de très long foyer achromatisé pour les rayons chimiques. Un second miroir presque normal au faisceau réfracté recevait celui-ci à une distance égale à la moitié de sa longueur focale et ramenait l'image à se former sur la paroi antérieure de la chambre noire auprès de l'objectif même. L'observateur se trouvait ainsi à portée de l'image et du miroir mobile, malgré la grandeur de la distance focale de l'objectif. »

Tout le monde désirera que cet instrument nouveau, entre les mains d'observateurs savants et habiles, justifie les espérances qu'il avait fait concevoir, par les découvertes et les travaux astronomiques qu'il rendra possibles.

CHAPITRE II

LES PHARES

§ 1. SIGNAUX MARITIMES. — PREMIERS PHARES DE RÉFLEXION OU CATOPTRIQUES.

Les phares n'étaient pas inconnus des anciens, témoin le fanal allumé sur une haute tour en avant du port d'Alexandrie, et qui existait encore, paraît-il, au douzième siècle ; l'îlot sur lequel cette tour était bâtie donna son nom à l'édifice, qui le transmit lui-même à tous les feux allumés sur les côtes pour la protection de la navigation. Les phares, encore peu nombreux au moyen âge, se sont multipliés à mesure que la navigation s'est elle-même étendue, et aujourd'hui ils éclairent de leurs feux variés toutes les côtes fréquentées par les navires de toutes les nations.

Ce n'est guère que depuis un siècle qu'on a cherché à mettre à profit les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière pour accroître la portée et l'éclat des lumières des phares. C'étaient autrefois de simples feux allumés au sommet d'une tour, exposés à toutes les intempéries[1]. On commença par y substituer des lampes protégées par des vitres; puis on songea à renvoyer au loin l'éclat lumineux à l'aide de réflecteurs de métal

1. « Il est très présumable que l'effet utile des plus vantés de ces amers nocturnes, sans excepter le fameux monument de l'ile de Pharos, était loin de répondre à la hauteur et au luxe architectural des édifices. De simples foyers de bois ou de charbon inégalement entretenus à l'air libre sur une grille de fer, ou des lampes fumeuses renfermées dans une lanterne vitrée, tels paraissent avoir été les seuls moyens d'illumination des phares antiques. » (Léonor Fresnel, *Introduction aux mémoires d'A. Fresnel sur les Phares.*)

poli. On créa ainsi les appareils connus sous le nom de *phares de réflexion* ou *phares catoptriques*. Ils n'eurent pas d'abord grand succès ; les lampes étaient défectueuses, et les réflecteurs, de forme sphérique, ne recevaient qu'une petite fraction des rayons de lumière, ou ne les projetaient pas dans une direction convenable. « En 1782, on avait établi ce genre d'éclairage à Cordouan ; mais, quoique ce phare ne comptât pas moins de quatre-vingts lampes, accompagnées chacune d'un réflecteur, il répandait une lueur si faible, que les navigateurs demandèrent instamment qu'on en revînt au système barbare du moyen âge. » (*Les Phares*, par Léon Renard.)

Un ingénieur du siècle dernier, Teulère, substitua aux miroirs sphériques des miroirs de forme parabolique, forme déjà proposée par Lavoisier. La lumière d'une lampe placée au foyer d'un miroir de ce genre est renvoyée en un faisceau cylindrique formé de rayons parallèles, dont l'intensité ne diminue point par conséquent avec la distance. Le seul affaiblissement de lumière est produit par l'épaisseur des couches d'air ou des brumes atmosphériques. Aux lampes ordinaires, le même inventeur substitua aussi les lampes à double courant d'air qu'Argant venait d'inventer ; plus tard les lampes Carcel, où l'huile est amenée au bec d'une manière continue par un mouvement d'horlogerie, augmentèrent encore l'éclat et la constance des feux que l'appareil réflecteur projetait à l'horizon. Teulère faisait d'abord tourner ses vingt-quatre miroirs, distribués sur trois cercles superposés, autour d'une lampe dont le bec restait dans l'axe de rotation, de sorte que la lumière était successivement projetée sur tous les points de l'horizon. Le but de ce mouvement de rotation était de répartir la lumière aussi uniformément que possible dans tous les azimuts, et non pas, comme on l'a écrit, de produire alternativement des jets de lumière et d'obscurité. Il n'est donc pas exact de dire que Teulère soit l'inventeur des *feux à éclipses :* ce perfectionnement a été appliqué pour la première fois en Suède, au phare de Marstrand. « Là, dit L. Fresnel, au lieu de recourir à l'emploi

d'écrans, d'où résulterait une perte notable d'effet utile, on obtenait des phases bien tranchées en faisant tourner le système des réverbères. Ils étaient au nombre de trois, disposés horizontalement en triangle équilatéral, autour d'un axe vertical, en sorte que, par l'effet de leur mouvement uniforme de rotation, ils produisaient, dans tous les azimuts, une succession régulière d'*éclats* alternant avec des éclipses. » Un phare de ce genre fut établi à Dieppe par Borda, en 1784, et un autre à la tour de Cordouan, sept ans plus tard, en 1791.

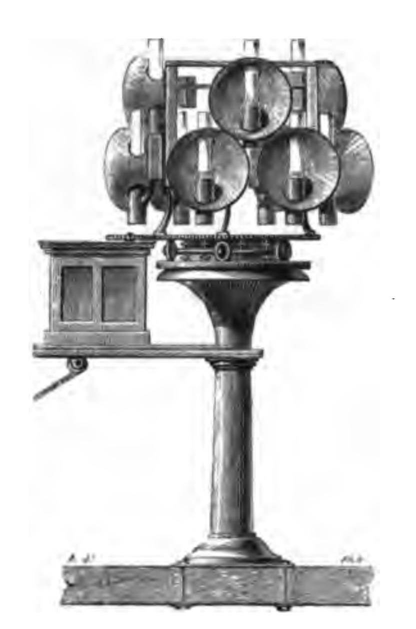


Fig. 263. — Phare catoptrique.

Les appareils catoptriques sont généralement formés de groupes de miroirs paraboliques dont chacun possède une lampe à son foyer. L'ensemble est mû par un mouvement d'horlogerie. Tel est celui que représente la figure 263. Il comprend trois systèmes de réflecteurs groupés eux-mêmes par trois, de sorte qu'une rotation complète donne, pour chaque point de l'horizon, trois illuminations et trois éclipses. On peut, en variant la vitesse du mouvement, obtenir des éclipses plus ou moins rapprochées, et distinguer ainsi les uns des autres les phares établis sur des points différents de la côte.

La portée des miroirs paraboliques est considérable. Des expériences dues à Biot et à Arago prouvent qu'un miroir de $0^{m},81$ d'ouverture donne une lumière visible dans les lunettes à une distance de quarante lieues. Néanmoins, la perte de lumière due à la réflexion, ou à l'absorption des rayons à la surface du métal, est d'au moins la moitié des rayons incidents. De plus, la surface polie des miroirs est rapidement altérée par l'action des vapeurs salines que l'air contient dans le voisinage

de la mer. Ces inconvénients ont fait abandonner peu à peu les phares catoptriques, au moins pour les phares de premier ordre ou de longue durée : en France, on ne s'en sert plus que pour l'éclairage des passes étroites, des chenaux, ou comme supplément d'un feu dans une direction où la portée de celui-ci est insuffisante.

Mais cet abandon n'a été possible qu'après l'invention des appareils lenticulaires, où la réfraction est totalement ou partiellement substituée à la réflexion pour la projection des feux : ce sont les phares munis de ces appareils qu'on nomme les *phares dioptriques*. Cette invention, due à l'illustre Fresnel, date seulement de l'année 1822.

§ 2. PHARES DE RÉFRACTION OU DIOPTRIQUES. — APPAREILS LENTICULAIRES DE FRESNEL.

Nous verrons plus tard, en parlant des verres ardents, que Buffon avait imaginé de construire des lentilles formées de portions concentriques d'une même lentille à grande ouverture, et de diminuer ainsi l'épaisseur du verre, et, par suite, la quantité des rayons de chaleur absorbés par leur passage dans le milieu réfringent. Ces *lentilles à échelons* n'avaient pas d'ailleurs été exécutées sur une grande échelle, à cause des difficultés de la fabrication, du coulage, de la taille et du polissage d'une masse de verre un peu considérable.

Fresnel, qu'Arago avait fait adjoindre à la commission nommée en 1819 pour le perfectionnement des phares, fut frappé de l'idée qu'on pourrait substituer avantageusement de grandes lentilles de verre aux réflecteurs paraboliques. D'une part, en effet, l'image lumineuse réfléchie par le miroir le plus parfait ne donne guère que moitié de l'éclat direct du corps éclaireur; d'autre part, la presque totalité du cône de rayons directs ayant pour sommet le bec de la lampe focale, et pour base l'ouverture circulaire d'un réverbère parabolique, est perdue à la mer pour l'effet utile. Il songea donc à substituer un appareil réfrac-

teur lenticulaire aux appareils catoptriques. Pour diminuer l'épaisseur centrale du tambour dioptrique, Fresnel eut la même idée que Buffon; mais il y apporta un double perfectionnement qu'on peut considérer comme capital. En premier lieu, il rendit possible et pratique la construction de lentilles à échelons de grande ouverture, en les formant de plusieurs morceaux qu'il est aisé de travailler séparément, et en unissant toutes les parties de la lentille à l'aide d'un mastic de colle de poisson qui permet de les faire adhérer solidement par leurs bords. En second lieu, il profita de ce mode de fabrication pour apporter à la forme même des surfaces réfringentes un perfectionnement auquel Buffon n'avait pas songé. Après avoir fait observer que si notre grand naturaliste n'avait pu faire exécuter une lentille à échelons de trois pieds de diamètre, c'est qu'il n'avait pas pensé à la faire de plusieurs morceaux, Fresnel ajoute : « Il n'avait pas fait attention non plus, à ce qu'il paraît, à un grand avantage que présente l'exécution séparée de la surface de chaque anneau, qui est de corriger presque entièrement l'aberration de sphéricité, quand les anneaux sont suffisamment multipliés, en déterminant par le calcul le centre et le rayon de courbure de chacun des arcs générateurs. Car, après avoir conçu d'abord la lentille terminée par une même surface sphérique, il suppose qu'on déprime celle-ci par échelons, mais de manière que les nouvelles portions de surfaces sphériques soient *concentriques* à la première ; ce qui n'est point le véritable moyen de corriger l'aberration de sphéricité. Le calcul apprend que les arcs générateurs des anneaux, non seulement ne doivent pas avoir le même centre, mais encore que ces différents centres ne sont pas situés sur l'axe de la lentille, et qu'ils s'en éloignent d'autant plus que les arcs auxquels ils appartiennent sont eux-mêmes plus éloignés du centre de la lentille ; en sorte que ces arcs, en tournant autour de l'axe, n'engendrent pas des portions de surfaces sphériques concentriques, mais des surfaces du genre de celles que les géomètres appellent *annulaires*. »

Pour utiliser le plus complètement possible les rayons de lumière émanés de la lampe située au foyer commun de toutes les lentilles qui composent un appareil dioptrique, Fresnel imagina de faire recevoir les rayons supérieurs, qui eussent été perdus, par des lentilles trapézoïdales; celles-ci étaient disposées tout autour de la lampe suivant une inclinaison telle, que les rayons se trouvaient réfléchis horizontalement en *rr*, par des

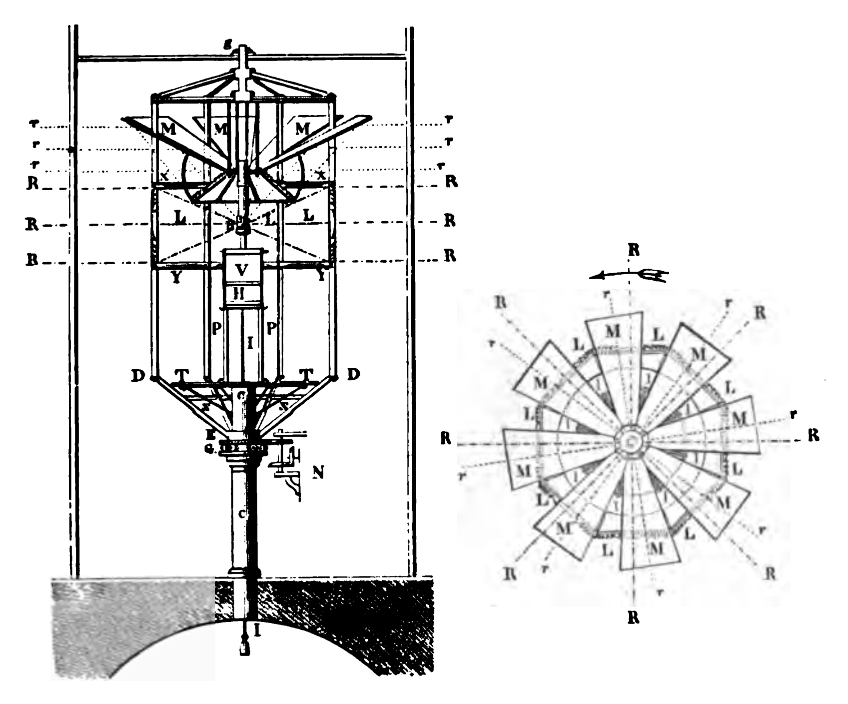


Fig. 264. — Premier appareil lenticulaire de Fresnel. Élévation et plan.

miroirs MM formant éventail, et allaient renforcer les faisceaux R des lentilles verticales.

La figure 264 montre le plan et la coupe d'un appareil lenticulaire, tel que Fresnel le disposa tout d'abord. Depuis, au lieu des lentilles inclinées et de leurs miroirs réflecteurs, il recueillit les rayons qui ne tombent point sur les lentilles verticales, par des séries de couronnes de miroirs de verre étamé, convenablement inclinées pour que la réflexion se fasse horizontalement; ou encore par des séries de prismes où les rayons lumineux

subissent la réflexion totale. Les figures 265 et 266 montrent la marche de ces rayons dans l'un et l'autre système.

Ainsi la réflexion et la réfraction sont également utilisées dans ces appareils, qui portent aussi pour cela le nom de *phares catadioptriques*. Fresnel ne se borna point à ces modifications capitales dans l'éclairage des phares ; il en perfectionna les lampes, avec le concours de F. Arago, y introduisit les systèmes des becs multiples, imaginés par Rumford, et combina heureusement le système Carcel, de manière à donner à la lumière le

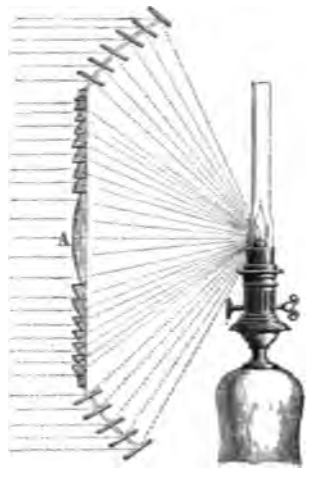


Fig. 265. — Marche des rayons dans un phare catadioptrique de Fresnel, à lentilles et à miroirs inclinés.

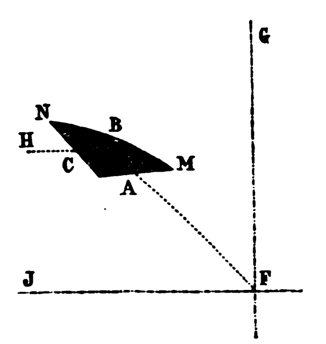


Fig. 266. — Réflexion totale dans les prismes des phares catadioptriques.

plus d'intensité et de régularité possible, qualités si précieuses dans ce genre d'application.

Fresnel projetait d'autres modifications à ses appareils lenticulaires, notamment à leur application à l'éclairage des entrées de port, mais sa santé gravement altérée ne lui permit point de les réaliser toutes. « L'exécution du premier appareil catadioptrique de feu de port était à peine commencée, dit son frère L. Fresnel, quand les progrès incessants de la maladie organique contre laquelle Fresnel luttait si péniblement depuis quelques années vinrent mettre un terme fatal à ses travaux scien-

tifiques et administratifs. « Que de choses j'aurais encore à faire! » disait-il en adressant un dernier adieu à son excellent ami Arago, qui l'avait si généreusement soutenu et encouragé à ses débuts dans la carrière des sciences. Cette suprême et douloureuse exclamation devait s'appliquer surtout, dans la pensée du mourant, à ses recherches sur la théorie de la lumière. Quant à son nouveau système de phares, il pouvait être considéré comme une œuvre achevée au point de vue théorique. Il ne s'agissait plus, en effet, pour le développement de cette brillante création, que de perfectionner les procédés d'exécution et d'étudier, sous le rapport pratique, les variantes qui pouvaient être utilement introduites dans les combinaisons des éléments dioptriques et catadioptriques imaginés par Fresnel, perfectionnements et études qu'il léguait aux continuateurs de ses travaux. » (*Introduction aux Mémoires d'A. Fresnel sur les phares*[1].)

Un mot maintenant sur les moyens employés pour diversifier les feux des phares et pour permettre aux marins de reconnaître les points de la côte en vue desquels ils se trouvent.

Les phares se divisent en feux de premier, de second et de troisième ordre, selon l'intensité de l'éclat et la portée de leur lumière. Les lampes des *phares de premier ordre* ont quatre mèches concentriques ; il y a trois mèches dans les *phares de second ordre* et deux mèches dans les *phares de troisième ordre*. L'éclat varie dans le rapport des nombres quatre, deux et un, et équivaut à vingt, à dix et à cinq lampes de Carcel. On a même depuis dépassé ce résultat.

Voilà pour les intensités. Mais, à intensité égale, on distingue

1. Citons encore ces paroles d'un digne appréciateur du génie de Fresnel, Émile Verdet : « On ne saurait estimer trop haut, dit-il, le service que l'inventeur des phares lenticulaires rendit à son pays et, on peut le dire, à tout le monde civilisé. Cependant, à l'occasion de ces services, si grands qu'ils soient, on ne saurait se défendre d'un regret. D'autres ingénieurs auraient tôt ou tard imaginé les lentilles à échelons, les lampes à mèches concentriques, les phares à éclipses; mais Fresnel pouvait seul continuer la révolution qu'il avait commencée dans la science. Qui peut dire ce qu'il aurait fait s'il lui avait été permis de poursuivre, sans interruption et libre de tout soin, le développement de ses fécondes pensées? » (*Introduction aux œuvres d'A. Fresnel.*)

les feux les uns des autres par le nombre des éclipses et la durée des intervalles qui les séparent, et aussi par la couleur de la lumière des éclats. Il y a les *feux fixes*, produits par un appareil lenticulaire de forme cylindrique ; puis les *feux à éclipses* à éclats blancs, rouges ou verts diversement combinés. L'appareil lenticulaire est alors formé d'un tambour octogonal principalement composé de huit lentilles simples à échelons. La



Fig. 267. — Appareil de premier ordre à feu fixe et à lumière blanche.

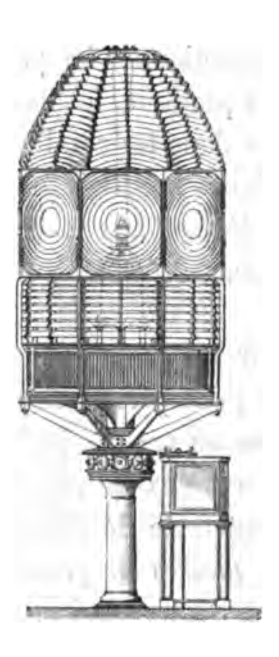


Fig. 268. — Appareil de premier ordre à éclipses de minute en minute.

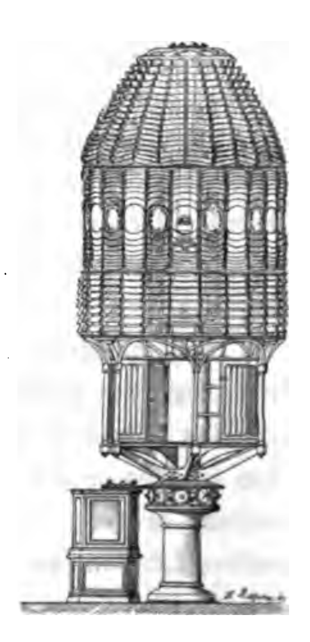


Fig. 269. — Appareil à feux blancs et rouges et à éclipses de 20 en 20 secondes.

rotation plus ou moins rapide du système donne lieu à une succession d'éclats et d'éclipses dont la durée varie. Enfin, à l'aide de glaces colorées interposées au devant des lentilles, on fait encore varier la couleur des feux. Les figures 267, 268 et 269 montrent comment sont disposés les appareils pour quelques-unes de ces combinaisons. On peut voir en outre, dans les figures 270, 271 et 272, comment les appareils sont installés dans la lanterne qui couronne la tour du phare, et quelle

est la disposition architecturale de l'édifice. Le phare de Cordouan a, comme on voit, un aspect tout à fait monumental et il est entièrement construit en pierres. Celui de la Nouvelle-Calédonie, tout récemment installé, est au contraire en tôle et en fonte de fer. Construit à Paris, il a donc pu être transporté



Fig. 270. — Appareil lenticulaire et lanterne d'un phare de premier ordre.

tout fabriqué au lieu de sa destination, où il est inauguré depuis douze ans.

Une nouvelle innovation a été introduite, en ces derniers temps, dans l'éclairage des phares. Elle est relative à l'emploi de la lumière électrique, substituée à celle d'une lampe ordinaire, et par conséquent à l'accroissement d'intensité et de por-

tée des feux des phares. Mais l'appareil dioptrique restant le même, nous n'avons point ici à nous occuper de ce système; nous y reviendrons dans le livre consacré aux applications de

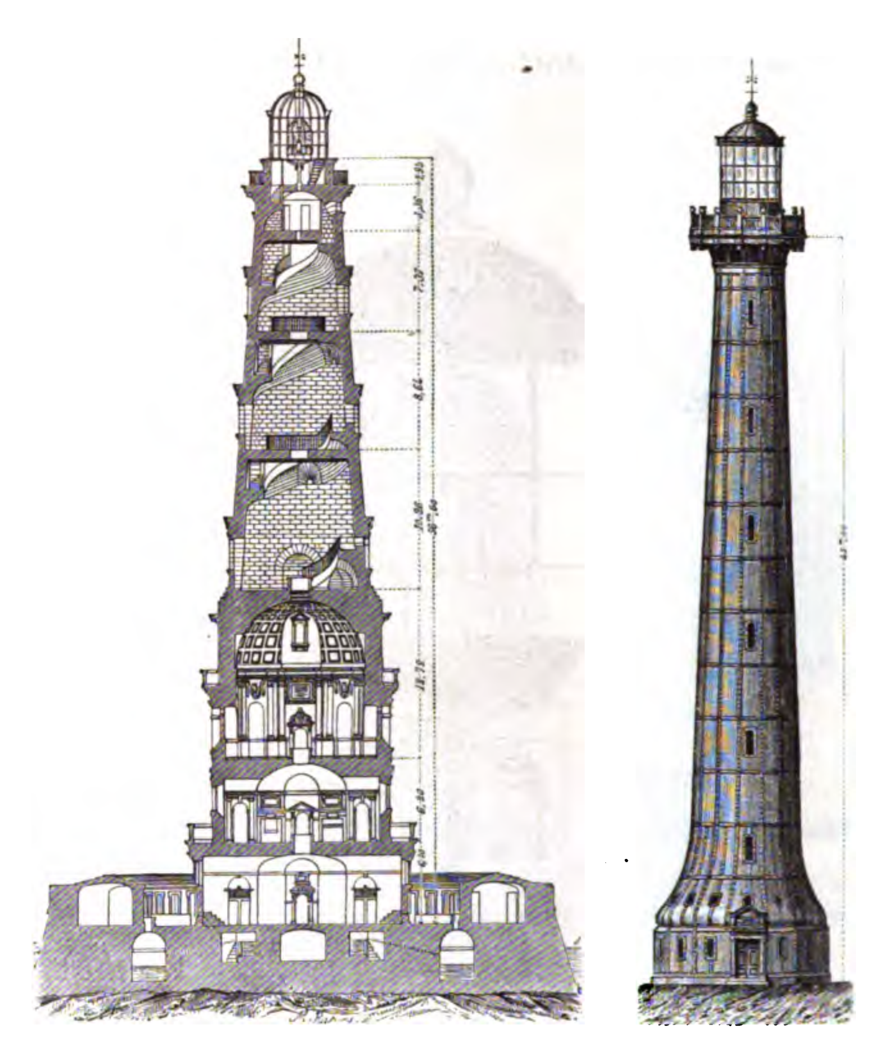


Fig. 271. — Intérieur du phare de Cordouan.

Fig. 272. — Le phare de la Nouvelle-Calédonie.

l'électricité, et c'est alors le mode d'éclairage, la nature de la lumière et les machines propres à la produire, qui attireront spécialement notre attention.

CHAPITRE III

LE MICROSCOPE

§ 1. LA LOUPE.

Un objet excessivement petit, même quand il est fortement éclairé, envoie dans l'œil, à la distance de la vision nette, un faisceau de lumière trop peu intense pour que l'impression sur la rétine produise une image distincte. Il faudrait le rapprocher de l'œil, augmenter ainsi son diamètre apparent ; mais alors la réunion des rayons émanés de ses divers points ne se ferait pas sur la rétine et l'image serait confuse.

Le *microscope* est un instrument destiné à venir en aide à la vue en produisant des images plus ou moins amplifiées des petits objets, que notre œil peut voir alors nettement comme à la distance de la vision distincte.

Il y a deux sortes de *microscopes :* la *loupe*, ou le *microscope simple*, et le *microscope composé*.

Il est bien probable, si cela n'est pas absolument prouvé, que les anciens n'ignoraient pas le pouvoir grossissant des masses de verre de forme sphérique. Un passage d'une comédie d'Aristophane montre que les Athéniens connaissaient le moyen d'allumer du feu à l'aide d'un morceau de verre qui concentrait à son foyer les rayons du Soleil. Les pierres fines gravées qui nous restent des Romains n'ont pu être travaillées sans le secours d'instruments grossissants. Ces instruments consistaient-ils en morceaux de verre taillés ou coulés en forme de

lentilles, ou n'étaient-ce que des boules creuses de verre remplies d'eau? Tout au moins cette dernière supposition est-elle rendue probable par le passage souvent cité des *Questions naturelles* de Sénèque : « Tous les objets vus à travers l'eau, dit-il, semblent plus considérables. Des caractères menus et peu distincts, lus au travers d'un globe de verre plein d'eau, sont plus gros à l'œil et plus nets. » Mais si les anciens ont connu le pouvoir optique des sphères d'eau ou de verre, ou même des lentilles de verre, il ne paraît pas qu'ils aient su en tirer parti ni les construire d'une façon précise. Aucune observation d'histoire naturelle ne nous a été laissée par eux qui témoigne d'un usage scientifique de la loupe dans l'antiquité.

Une simple lentille convergente, plan-convexe ou biconvexe, enchâssée dans une monture dont la forme varie avec la destination, tel est le microscope réduit à sa plus grande simplicité. C'est ce qu'on nomme ordinairement une *loupe*.

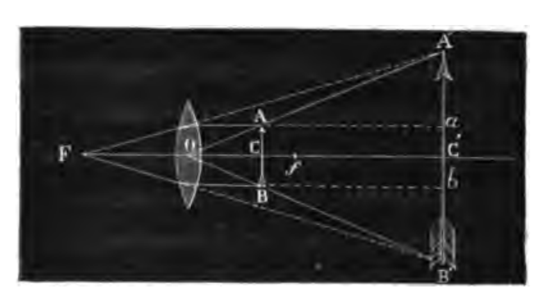


Fig. 273. — Marche des rayons lumineux dans la loupe. Grossissement.

La figure 273 représente la marche des rayons lumineux dans une loupe; l'objet AB est placé à une distance de la lentille plus petite que la distance focale principale. L'œil O*f*, placé au point F de convergence, reçoit ces rayons comme s'ils émanaient des points A'B', c'est-à-dire d'une image virtuelle droite et agrandie de l'objet.

Pour que cette image soit bien nette, il faut que la distance A'F soit égale à celle de la vision distincte pour l'observateur, d'où résulte, pour la position de l'objet, un point déterminé qu'on peut, soit calculer, soit trouver aisément par tâtonnement ou par expérience. Cette position diffère très peu de celle du foyer principal *f*; elle en diffère d'autant moins que la courbure

de la lentille est plus forte, c'est-à-dire qu'elle est à plus court foyer. Si l'on place l'objet plus loin de la lentille, il arrive bientôt au foyer principal *f*, et l'image, qui a diminué d'amplitude, s'en va à l'infini. Si, au contraire, on rapproche l'objet de la loupe, son image grossit, mais devient confuse.

Comment mesure-t-on le grossissement d'une loupe?

Le grossissement, dans les instruments d'optique, dans le cas de la vision nette des images, n'est autre chose que le rapport qui existe entre le diamètre apparent de l'objet et le diamètre apparent de l'image. On entend par là la valeur des angles sous lesquels l'œil voit, soit l'un, soit l'autre de ces diamètres, supposés placés à la même distance de la vision distincte. Dans le cas de la loupe, la distance de l'œil à la lentille pouvant être négligée, le grossissement est égal au rapport des angles A′OB′ et *aOb*, ou sensiblement à celui des dimensions A′B′, AB, lequel, enfin, est égal au rapport des distances OC′ et OC. La distance OC′ étant celle de la vision distincte, le grossissement ne dépend plus, comme on voit, que de la distance OC′ de l'objet à la lentille, c'est-à-dire de la distance focale principale, qui en diffère très peu.

Ainsi, plus une loupe aura une courbure prononcée ou un court foyer, plus en outre la vision distincte de l'observateur sera longue, plus le grossissement sera considérable.

La loupe montée, comme le représente en coupe et en perspective la figure 274, 1, 2, est celle qu'emploient le plus souvent les horlogers et les graveurs. Elle se tient à la main ou même près de l'œil, où l'observateur la maintient par un effort des muscles des sourcils et de la joue : de la sorte les mains restent libres ; mais il est préférable de l'adapter à un support ou *porte-loupe* (fig. 275).

Le grossissement de ces loupes ne dépasse guère 5 fois ; de plus, elles sont affectées d'un défaut assez grave : celui d'avoir une forte *aberration de sphéricité*. On nomme ainsi un phénomène dont la constatation est bien simple : Regardez un objet

d'une certaine dimension avec une loupe semblable, vous verrez que l'image n'est très nette que dans la partie centrale; sur les bords, elle est déformée et diffuse. De plus, elle est irisée, ce qui tient à un autre défaut : celui du manque d'*achromatisme*. Mais elle a un avantage qui compense en partie ces inconvénients : celui d'avoir un champ étendu; sa grande distance focale permet aussi de mouvoir les mains et les objets

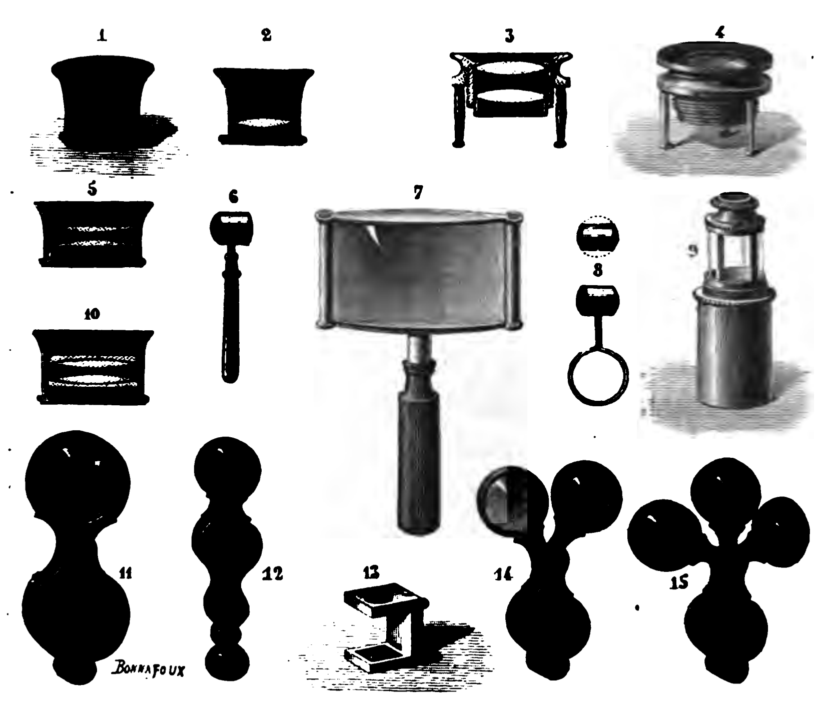


Fig. 274. — Loupes de divers genres : 1, 2, loupe des horlogers et des graveurs; 3, 4, 5, loupes achromatiques; 6, loupe de Stanhope; 7, loupe à surface cylindrique; 8, loupe rodée de Brewster, dite de Coddington; 9, loupe ou microscope à graine; 13, compte-fils; 11, 12, 14 et 15, loupe des naturalistes, biloupes et triloupes.

au-dessous de la loupe et de faire sans gêne le travail qu'on a en vue.

On diminue l'aberration de sphéricité en appliquant sur les bords de la lentille un diaphragme ou plaque annulaire opaque qui arrête les rayons de cette partie de la lentille ; mais le champ se trouve ainsi diminué.

Pour détruire à la fois l'aberration de sphéricité et l'achromatisme, on compose la loupe soit de deux lentilles plan-

convexes dont les convexités se regardent, soit de deux lentilles toutes deux achromatiques formées chacune, comme on le verra plus loin, de deux verres convenablement choisis. Les courbures peuvent être calculées de manière à détruire l'aberration de sphéricité.

Les loupes que représente la figure 274, 11, 12, 14 et 15, sont employées par les naturalistes. La même monture renferme deux ou trois grossissements différents : on nomme alors ces instruments *biloupes* et *triloupes*.

La loupe *périscopique* de Wollaston et la loupe de Brewster ou de Coddington ont cela de commun que le diaphragme est

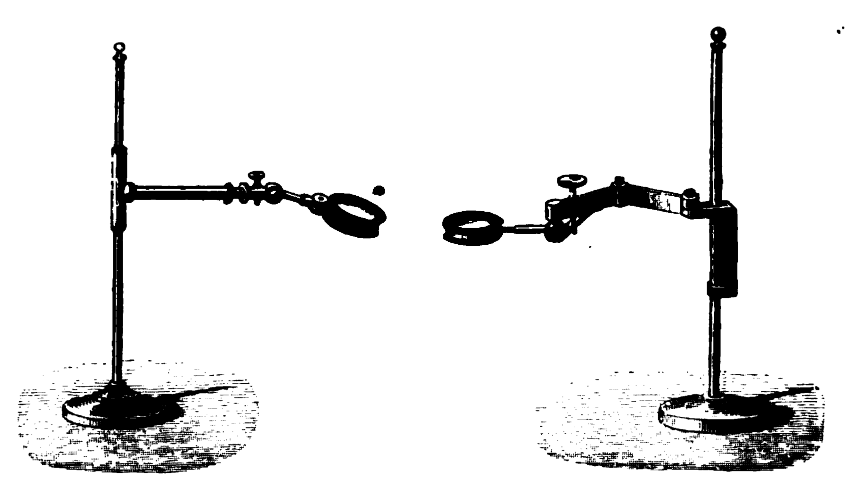


Fig. 275. — Porte-loupe. Fig. 276. — Porte-loupe, autre modèle.

placé à l'intérieur, dans la masse du verre ; mais la dernière est un secteur cylindrique découpé dans une sphère : le milieu du cylindre est taillé en gorge de manière à former diaphragme. On peut avec cette loupe obtenir des grossissements de 30 fois.

La loupe Stanhope est aussi formée d'un cylindre de verre, mais la courbure des deux surfaces n'est pas la même. En appliquant sur la surface la plus plate les petits objets transparents qu'on veut étudier, les graines de pollen, les écailles des ailes de papillon, etc., et en regardant par l'autre face du côté du jour, on obtient l'image éclairée et amplifiée de l'objet avec un grossissement qui peut atteindre 40 fois.

§ 2. LE MICROSCOPE SIMPLE. — DOUBLET DE WOLLASTON.

Le *microscope simple* (inventé par Cuff, et qu'on nomme aussi *microscope de Raspail*) est une loupe montée sur un support en cuivre, qui soutient lui-même une plaque ou *porte-objet* sur laquelle se pose l'objet qu'on veut étudier, et, plus bas, un miroir plan ou concave, destiné à projeter la lumière du jour sur le même objet. Par le jeu d'un bouton et d'une crémaillère, on peut élever ou abaisser soit la loupe, soit le porte-objet, pour *mettre au point*, c'est-à-dire pour les placer l'un et l'autre dans la position la plus favorable à la production d'une image nette,

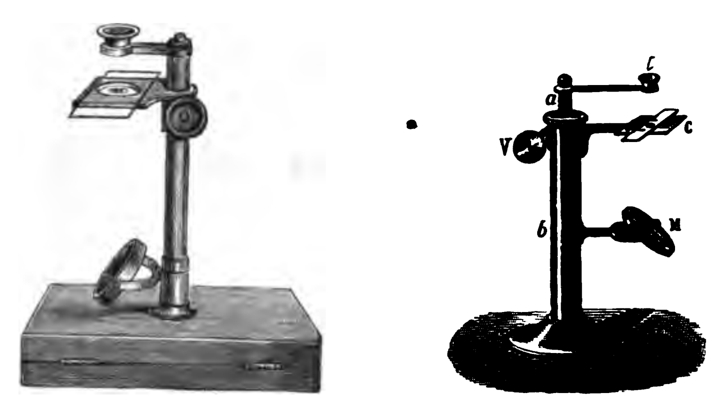


Fig. 277. — Microscopes simples.

position qui varie selon les individus ou selon les grossissements employés. La plaque est percée d'une ouverture qui laisse passer la lumière envoyée par le miroir, et l'objet se pose sur une lame de verre au-dessus de l'ouverture.

On fabrique aussi des microscopes simples plus compliqués, comprenant deux loupes qui peuvent prendre des directions plus ou moins inclinées, de façon à rendre possible l'examen de l'objet sur toutes ses faces.

Au lieu d'une loupe simple, on adapte souvent au microscope une loupe formée de deux verres séparés par un diaphragme dans le but de détruire l'aberration de sphéricité et d'avoir une

loupe achromatique : c'est le *doublet*, inventé par Wollaston ; la figure 278 donne, avec la vue d'un microscope simple à doublet, la coupe d'un doublet perfectionné par Ch. Chevalier. La

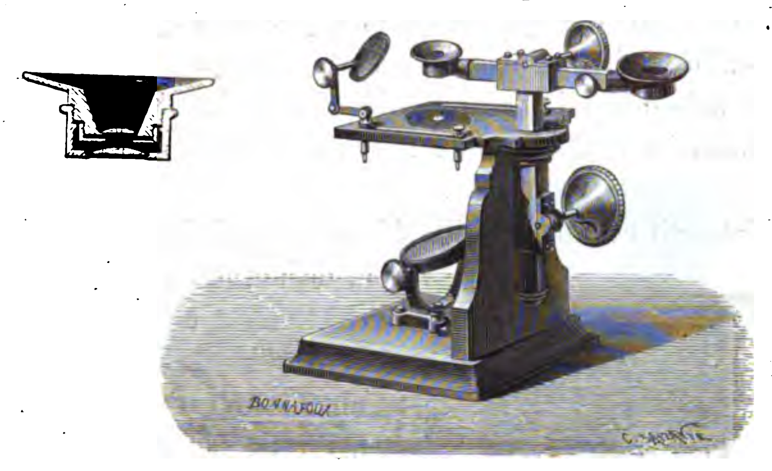


Fig. 278. — Microscope simple à doublet. Doublet de Wollaston, modifié par Ch. Chevalier.

loupe composée (fig. 279) remplit le même objet ; elle est constituée par des loupes à lentilles convexes, de grossissements et de champs différents, qu'on peut superposer à volonté.

La loupe et le microscope simple ont rendu aux sciences de grands services. Ce dernier est employé surtout pour la préparation et la dissection des objets, notamment pour l'anatomie végétale, car les histologistes lui préfèrent, pour la dissection des tissus animaux, le microscope composé. Dans ce cas, on dépasse rarement les grossissements de soixante fois, parce que, avec des amplifications plus fortes, le foyer de la lentille est si court que la place manque au-dessous pour la manipulation. Pour les simples observations, on peut employer des doublets qui grossissent jusqu'à 500 fois ; mais, en ce cas, le foyer de la loupe n'est que de $0^{mm},45$, pas la moitié d'un millimètre.



Fig. 279. — Loupe composée.

§ 3. LE MICROSCOPE COMPOSÉ.

Dans le microscope composé, il y a deux systèmes de lentilles : l'un qu'on nomme l'*oculaire*, parce que c'est celui qu'on place près de l'œil ; l'autre, l'*objectif*, ainsi nommé parce qu'il est tourné vers l'objet dont il s'agit d'obtenir une image amplifiée.

L'objectif est une lentille *biconvexe* qui fournit une image réelle, déjà grossie, mais renversée de l'objet. C'est cette image qu'on examine à l'aide de l'oculaire, lequel joue ainsi le rôle d'une loupe : seulement, cette loupe sert à voir et à amplifier, non plus l'objet, mais son image.

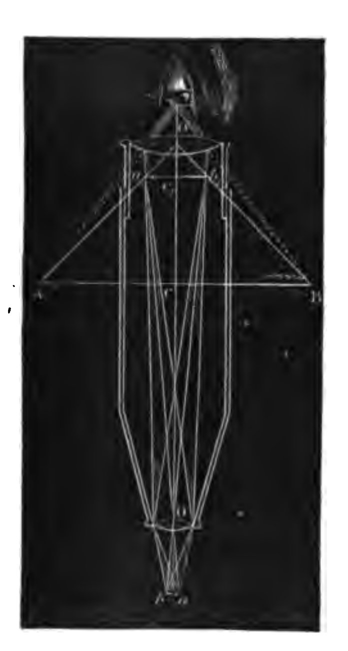


Fig. 280. — Marche des rayons lumineux dans le microscope composé.

La figure 280 montre quelle est, dans le microscope composé, la marche des rayons lumineux. O′ est l'oculaire, et O l'objectif, au devant duquel on voit le petit objet *ba*. L'objectif produit en $a_1 b_1$, qui est le foyer de la loupe oculaire, une image agrandie qui sert à son tour d'objet : cette image est renversée, et comme l'oculaire ne fait que l'amplifier sans la redresser, l'œil voit l'objet lui-même renversé, comme s'il était en AB, c'est-à-dire à la limite inférieure de la vision distincte.

Tel est l'appareil optique du microscope composé réduit à son expression la plus simple. Mais il y a lieu, comme pour la loupe, de corriger les défauts, soit de l'objectif, soit de l'oculaire, au point de vue de l'aberration de sphéricité et de l'aberration de réfrangibilité.

On corrige le premier défaut en limitant l'étendue de l'image

réelle au moyen d'un diaphragme placé au foyer de l'oculaire, c'est-à-dire en $a_1 b_1$. Mais, comme on limite aussi de la sorte le champ du microscope, on emploie un oculaire d'un grand diamètre, ayant par conséquent un champ plus étendu. Dans le même but, on se sert aussi pour oculaire d'un système de deux lentilles plan-convexes dont la convexité est opposée à l'œil.



Fig. 281. — Oculaire achromatique de Campani.

Tel est l'oculaire de Campani, qui a en même temps la propriété de détruire l'irisation des images ou de rendre l'objectif achromatique. Voici comment ce but se trouve atteint.

SI est un pinceau lumineux parti des bords de l'objet; en se réfractant il se divise en rayons colorés, les rouges suivant la direction IR, les violets la direction IV, de sorte que l'œil verrait le bord de l'objet irisé, si le second oculaire L′ ne rendait les rayons colorés parallèles en B, où ils forment de la lumière blanche. C'est là que l'œil se place pour observer.

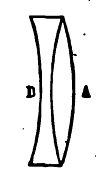


Fig. 282. — Objectif achromatique.

L'achromatisme s'obtient aussi en composant l'objectif de deux lentilles, l'une B de flint-glass, l'autre A de crown-glass, celle-ci biconvexe et celle-là divergente (fig. 282).

Le grossissement que donne le microscope composé est une combinaison du grossissement de l'objectif multiplié par celui de l'oculaire. Supposons l'image réelle fournie par le premier système amplifiée vingt fois; si l'oculaire la grossit encore cinq fois, il est clair que le grossissement total sera de 100 fois.

Dans tout cela, il n'est question, bien entendu, que du grossissement linéaire ou *en diamètre*. Le grossissement en surface

est évidemment égal au carré du nombre qui mesure le premier. Ainsi, pour une amplification en diamètre de 50, de 100, de 500, la surface de l'objet se trouve amplifiée 2500, 10000, 250000 fois. D'après M. Arthur Chevalier, on construit aujourd'hui des microscopes composés dont les systèmes optiques sont divisés en neuf séries, selon le grossissement, depuis le n° 1, qui donne un pouvoir de 25 à 50 diamètres, jusqu'au n° 9, qui grossit de 600 à 1300 fois. Avec cette dernière amplification, les surfaces sont multipliées par le nombre énorme 1690000. Il est donc possible d'apercevoir des parties de la matière qui ont moins d'un millième de millimètre d'étendue[1]. Mais il ne faut pas oublier que l'art d'observer au microscope ne s'acquiert que par une longue habitude : l'œil a besoin de faire son éducation pour utiliser les grossissements les plus forts, et les étudiants qui veulent arriver à l'habileté des maîtres, feront bien de commencer leurs observations par l'emploi gradué des faibles amplifications. Faisons aussi observer que plus le grossissement est considérable, plus la lumière qui est répandue sur l'objet et qui le rend visible se divise et se diffuse, plus il est donc nécessaire d'employer une lumière vive pour éclairer l'objet.

1. Grâce à l'exigence toujours croissante des micrographes et à l'habileté pratique des opticiens, on construit depuis une vingtaine d'années des objectifs achromatiques qui permettent des grossissements bien plus considérables que ceux que nous venons de citer. Voici ce que dit sur ce sujet M. le docteur J. Pelletan, qui a publié un ouvrage très apprécié intitulé *le Microscope et ses usages* : « On s'est aperçu qu'en combinant plusieurs systèmes de lentilles suivant des formules diverses, on pouvait arriver à agrandir considérablement l'angle du cône lumineux admis dans l'objectif. Mais cela n'était possible qu'avec une distance frontale extrêmement courte. En revanche, on obtenait avec ces objectifs à grande ouverture des images bien autrement parfaites qu'avec les anciens objectifs à petits angles. Voyant qu'on pouvait utiliser ces objectifs à très courte distance, les opticiens en ont profité pour diminuer encore le rayon de leurs lentilles, diminuer par conséquent le foyer et augmenter le grossissement. Ils sont arrivés ainsi à réaliser des amplifications formidables. Mais il ne faut pas oublier que les chiffres donnés dans les catalogues sont le plus souvent fantaisistes. » Le docteur Pelletan cite un microscope construit par l'opticien américain Tolles, dont le grossissement *serait de* 15000 *diamètres* avec un objectif de 1/75 de pouce, et un oculaire de 1/2 pouce à la distance de 25 centimètres. Mais il ajoute : « Je dis *serait*, car je ne crois pas que *pratiquement* cet objectif puisse être utilisé avec un tel oculaire. Il est très difficile de maniement, comme on le comprend ; on ne peut s'en servir qu'au fond d'une cave pour éviter les vibrations. »

Passons maintenant en revue quelques-unes des dispositions adoptées par les constructeurs pour les microscopes composés.

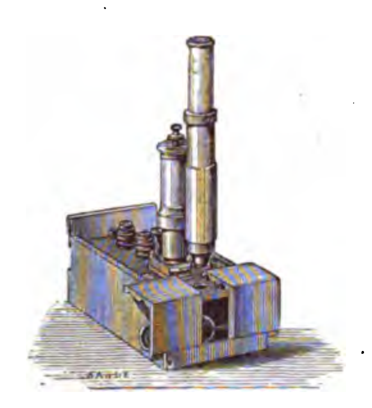


Fig. 283. — Microscope composé, monté sur sa boite.

Comme dans le microscope simple, on distingue trois parties principales dans le microscope composé : l'appareil *optique* qui contient l'oculaire et l'objectif, renfermés dans un même tube, le *porte-objet* qui prend des formes variées, mais qui est le plus souvent formé par une platine percée d'une ou plusieurs ouvertures circulaires sur lesquelles on pose le verre qui porte l'objet, enfin le *miroir* qui réfléchit la lumière sur le verre et l'objet lui-même. Si l'objet n'est pas transparent, on l'éclaire par-dessus au moyen d'une lentille disposée latéralement et pouvant se mouvoir en divers sens.

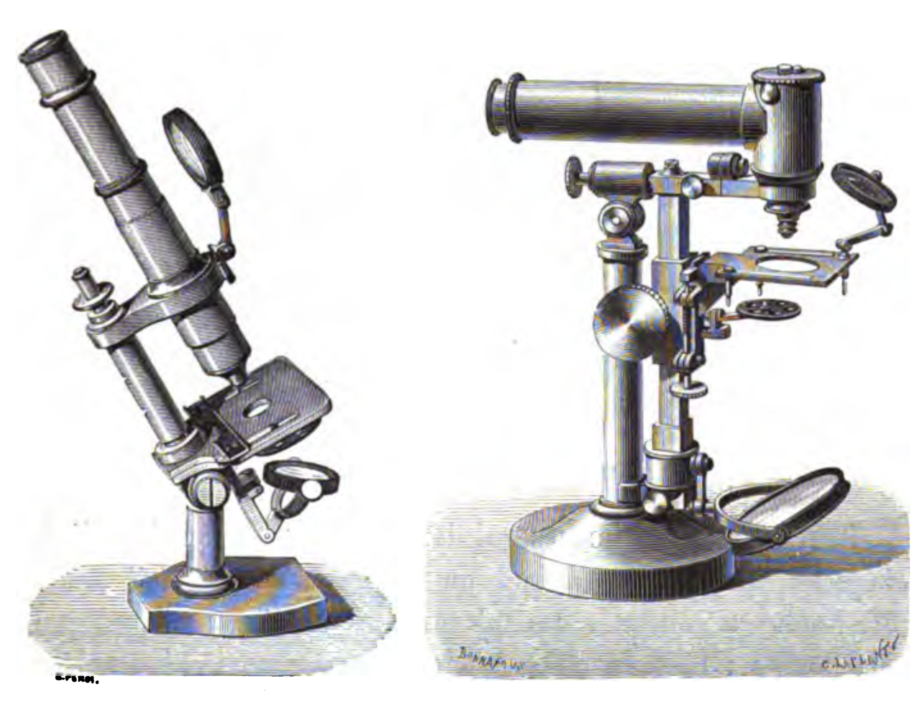


Fig. 284.—Microscope inclinant de Nachet. Fig. 285. — Microscope horizontal d'Amici.

Tantôt le tube optique est vertical (fig. 283 et 286), tantôt il est susceptible de s'incliner obliquement (fig. 284), tantôt enfin, comme dans le microscope d'Amici (fig. 285), il est coudé à angle droit : la partie horizontale renferme l'oculaire, la partie verticale l'objectif; à leur rencontre, un miroir incliné à 45 degrés, ou un prisme, réfléchit les rayons lumineux sortis de l'objectif et les renvoie horizontalement dans l'oculaire.

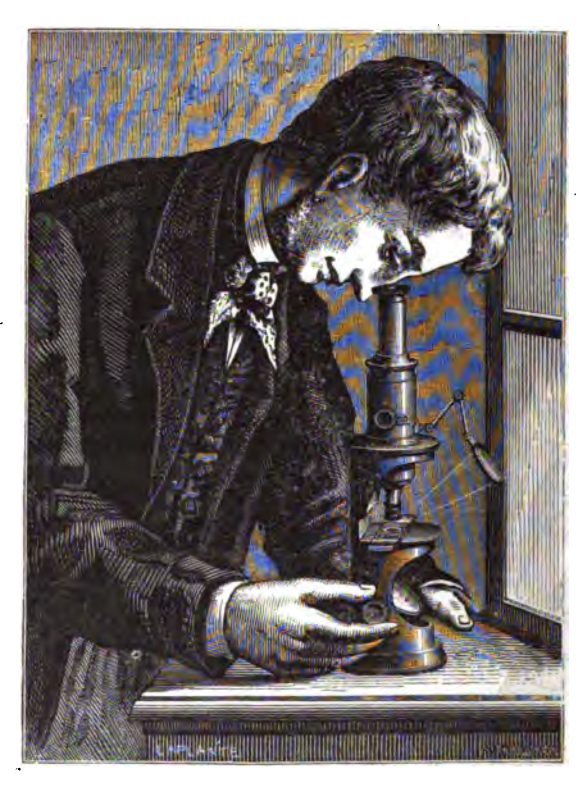


Fig. 286. — Observation au microscope composé.

Pour obtenir des images qui donnent la sensation du relief, laquelle n'existe pas quand on observe avec un œil seul, M. Nachet a construit des microscopes où l'appareil optique est double : c'est ce qu'on nomme le *microscope binoculaire* (fig. 288). Quand nous étudierons la vision stéréoscopique, on comprendra la nécessité de cette disposition, qui met l'observateur en garde contre des illusions forcées, illusions provenant de la façon dont se trouvent éclairés les détails d'objets qu'il

étudie souvent pour la première fois et dont la structure réelle lui est inconnue.

Le même constructeur fait des microscopes à trois corps, qui permettent l'observation simultanée par trois personnes différentes. Ces instruments sont précieux dans l'enseignement de la micrographie. Dans les microscopes à deux ou trois corps,

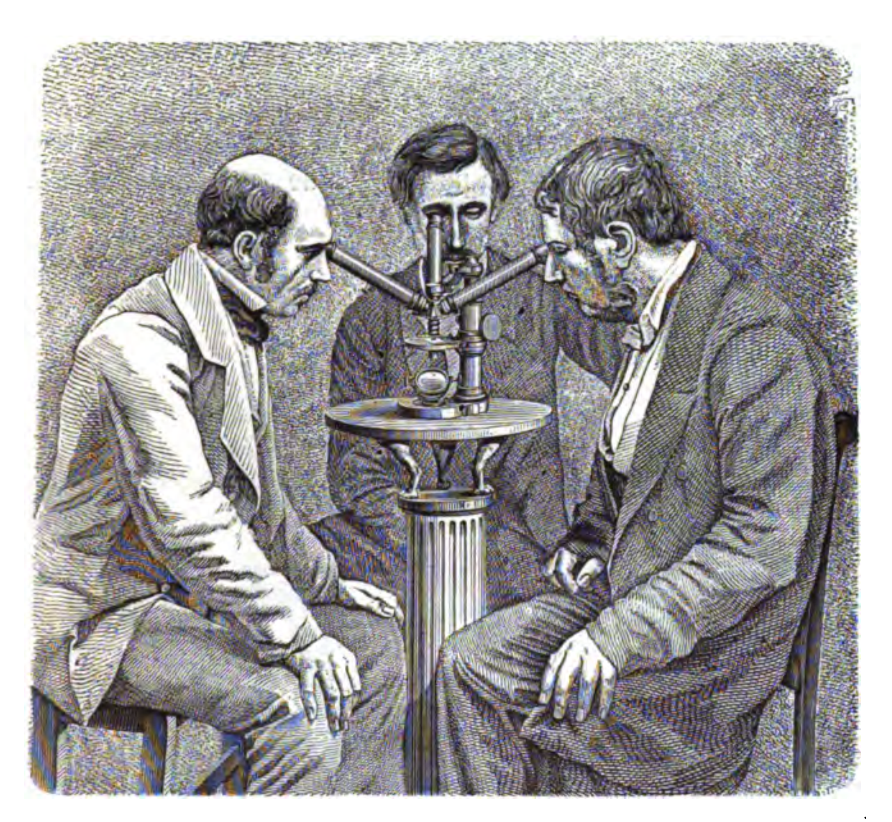


Fig. 287. — Microscope à trois corps pour les observations simultanées.

l'objectif est unique; mais il y a au-dessus un prisme isoscèle à arêtes horizontales, qui reçoit les faisceaux émanés de l'objet et, après une réflexion totale, les fait émerger dans deux ou trois directions différentes (dans ce dernier cas, le prisme est remplacé par une pyramide). Ces directions sont celles des porte-oculaires. Deux ou trois observateurs peuvent ainsi étudier en même temps le même objet, et se communiquer leurs remarques.

Enfin, on fait aussi des microscopes spéciaux pour les chimistes (fig. 289). Le porte-oculaire est incliné et va aboutir au-dessous de l'objectif, placé lui-même au-dessous du porte-objet. Un prisme renvoie, par le phénomène de réflexion totale, les rayons lumineux dans la direction de l'œil.

§ 4. LE MICROSCOPE SOLAIRE.

Nous terminerons cette description du microscope, en donnant celle d'un appareil qui a pour objet de projeter à distance




Fig. 288. — Microscope binoculaire.



Fig. 289. — Microscope à l'usage des chimistes.

sur un écran, les images agrandies, de manière à les rendre visibles à la fois pour un grand nombre de spectateurs. C'est le *microscope solaire*, ainsi nommé parce que la lumière avec laquelle on éclaire l'objet est la lumière directe des rayons du Soleil.

Le microscope solaire est destiné à projeter sur un écran l'image considérablement agrandie d'un objet très petit. C'est un mégascope, dont la disposition particulière permet d'ob-

server commodément et de faire voir à un grand nombre de spectateurs l'image dont nous parlons. Dans ce but, l'objet est placé un peu au delà du foyer principal d'une lentille à court foyer. Le grossissement, d'après ce que nous avons vu, sera d'autant plus considérable que la distance de l'objet au foyer sera plus petite. Mais alors l'image ira se former à une dis-

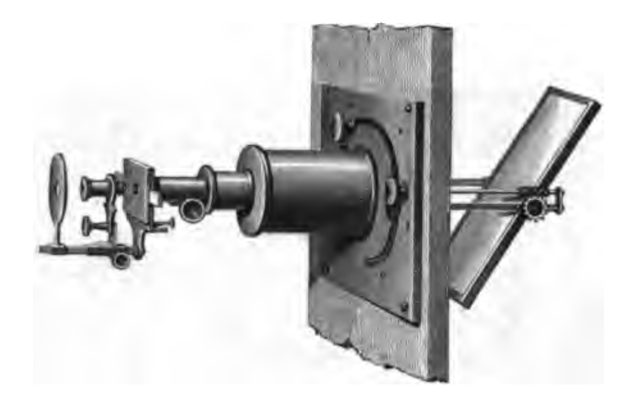


Fig. 290. — Microscope solaire. Vue d'ensemble.

tance d'autant plus grande de la lentille ; et plus le grossissement sera fort, plus la lumière se trouvera éparpillée et par suite affaiblie ; de là la nécessité d'éclairer très vivement l'objet, de façon que l'image conserve un éclat suffisant. Voilà

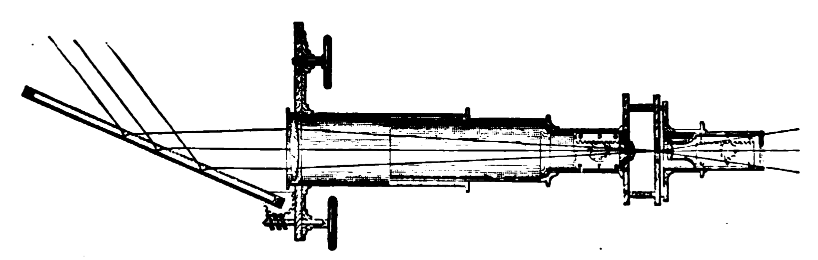


Fig. 291. — Coupe du microscope solaire.

pourquoi l'on reçoit sur une glace convenablement inclinée, soit les rayons du Soleil, soit ceux d'une source très intense, comme la lumière électrique. La glace les réfléchit et les envoie sur une lentille à grande ouverture qui les fait converger une première fois. Une seconde lentille les concentre à son foyer, et c'est en ce dernier point que se trouve placé l'objet

dont on veut étudier les détails de structure. Les figures 290 et 291 donnent l'ensemble du microscope solaire et sa construction interne.

On nomme microscope à gaz celui dans lequel l'objet est éclairé par la lumière Drummond; et microscope photo-électrique, celui dans lequel c'est la lumière très vive de l'arc voltaïque qui supplée aux rayons solaires.



Fig. 293. — Microscope photo-électrique.

Quand le Soleil ne brille point, on serait obligé de se passer de ce moyen puissant de démonstration dans les cours, si l'on n'avait à sa disposition une source de lumière presque aussi vive que le Soleil : nous voulons parler de la lumière électrique. De là le microscope photo-électrique que représente la figure 292.

Rien n'est plus curieux que de voir, dans les cours de physique, les images prodigieusement agrandies des détails organiques des animaux les plus infimes, les infusoires qui se

meuvent dans une goutte de colle ou de tout autre liquide en fermentation, la décomposition spontanée de l'eau en globules gazeux d'oxygène et d'hydrogène, la cristallisation des sels, la structure des tissus animaux et végétaux.

Enfin, il est une application importante de la microscopie que nous ne pouvons passer sous silence : c'est celle qui permet de photographier, dans tous leurs détails si précis et si curieux, les images des objets observés par les micrographes, et de rendre ainsi durables des observations souvent fugitives. Nous consacrerons plus loin un paragraphe spécial à la *photomicrographie*, nom sous lequel cette double application des lois de la lumière est aujourd'hui désignée.

§ 5. APPLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MICROSCOPE.

Pour donner une idée des immenses services que le microscope a rendus à la science, pour initier le lecteur qui n'a pas cet instrument précieux à sa disposition, aux merveilles du monde de l'infiniment petit, nous reproduisons, dans les trois planches XV, XVI et XVII, quelques échantillons d'objets vus au microscope et pris dans les trois grandes branches des corps naturels, les animaux, les végétaux et les minéraux. C'est à l'obligeance de notre ami Georges Pouchet, sous-directeur du cabinet et du laboratoire d'histologie que dirige M. Robin, et au talent d'un habile dessinateur, M. Deyrolle, que nous devons ces belles planches : les notes suivantes que M. Pouchet a bien voulu rédiger pour servir de texte explicatif aux dessins en rendront l'intelligence facile. Puissent ces spécimens d'une des plus belles applications de la physique à la science engager quelques-uns de nos lecteurs à se livrer aux études si attrayantes de la micrographie !

PLANCHE XV.

1. *Cristaux de sang*, vus à un grossissement de 6 ou 700 diamètres. On appelle ainsi des cristaux colorés qui peuvent se former spontanément dans le sang de l'homme ou des animaux, soit après la mort, soit dans le cours de certaines maladies. En général, pour les

obtenir; on lave du sang frais avec de l'éther, et on laisse reposer : au bout de quelques jours, on trouve parfois un abondant dépôt de ces cristaux.

2. *Cristal* obtenu en traitant par un mélange bouillant d'alcool et d'éther des *œufs de homard* écrasés. Ceux-ci, quand on les prend sous le ventre de l'animal vivant et qu'on les écrase, forment une bouillie verte. Dès qu'on ajoute le réactif, elle devient rouge et se solidifie. Si on la jette alors sur un filtre, le mélange d'éther et d'alcool passe avec une belle couleur pourpre et laisse déposer, en se refroidissant, des cristaux qui offrent par transparence l'aspect représenté et qui, à la lumière réfléchie, ont un beau reflet métallique bleu. — Grossissement de 100 diamètres.

3. *Cristaux de santonine* vus à la lumière polarisée à travers une lame de mica ou de sélénite. Ces cristaux sont par eux-mêmes très légèrement jaunâtres, ils doivent leurs couleurs variées à la polarisation. Grossissement de 50 diamètres environ. — Ces cristaux sont extraits de la drogue connue en pharmacie sous le nom de *semen contra* et qu'on emploie contre les vers. Elle jouit de la propriété, quand on en a pris à dose élevée, de faire voir tout en jaune; mais c'est une expérience dangereuse et dont la vue peut souffrir.

4. *Or mosaïque,* minerai d'or attaché à une pierre vitreuse. Grossissement de 60 diamètres environ. L'or, disposé en grains irréguliers, offre diverses couleurs dépendant de l'état de pureté plus ou moins grand où il se trouve.

5. *Cristaux de chlorhydrate d'ammoniaque,* à un grossissement de 100 diamètres environ. Il suffit, pour les obtenir, de mouiller une lame de verre avec de l'acide chlorhydrique et de l'exposer ensuite aux vapeurs d'ammoniaque. Il se forme aussitôt des cristaux extrêmement variés de forme et de figure, qui finissent par occuper toute la lame.

6. *Cristaux de sel marin.* — Grossissement de 100 diamètres. Pour les obtenir, il suffit de déposer une goutte d'eau où l'on a mis un grain de sel sur une lame de verre. A mesure que l'eau s'évapore, il se forme une infinité de cristaux. Ceux-ci appartiennent au système cubique, mais ils sont souvent aussi excavés sur leurs faces, dans lesquelles sont creusées des cavités en escalier : d'où ces cristaux ont été dits *en trémies.*

7. *Titane cristallisé,* en cubes également, sur les scories d'un haut fourneau. Grossissement de 60 diamètres.

8. *Cristaux de bichromate de potasse;* grossissement de 100 diamètres. Pour les obtenir. il suffit de laisser pendant quelque temps sur une lame de verre une goutte d'une solution de bichromate de potasse. On voit bientôt les cristaux se former et grandir dans le champ du microscope.

9. *Cuivre natif,* à un grossissement de 60 diamètres. Certains minerais de cuivre, particulièrement dans le pays de Galles, présentent des échantillons de ce cuivre fibreux.

Planche XVI.

Fig. 1. *Coupe mince de bois d'ébène.* — Il contient dans ses cellules deux sortes de matières colorantes, l'une rouge, l'autre noire, celle-ci renfermée dans des cellules beaucoup plus grandes. Les fibres de bois que l'on voit également coupées en travers sont brunes. Grossissement de 350 diamètres.

Fig. 2. *Trachées des végétaux.* — Celles-ci sont formées d'un faisceau contre la paroi interne duquel est enroulé un filament en spirale. Toutefois ce filament est remplacé par une série d'anneaux plus ou moins réguliers. On distingue dans le voisinage un certain nombre de cellules à mince paroi, en partie remplies de matière verte. Grossissement de 350 diamètres.

Fig. 3. *Poil d'ortie.* — La base renflée est remplie de cellules avec de la matière verte. Le reste du poil est formé par une seule cellule à parois dures et cassantes, ayant la forme

d'une pointe. Cette cellule est remplie d'un liquide âcre. Quand l'extrémité du poil d'ortie pénètre dans les chairs, elle se brise ordinairement et le liquide qu'elle contient est versé dans la plaie : de là l'inflammation et les douleurs qui en sont la conséquence. Grossissement de 150 diamètres.

Fig. 4. *Fragment d'une petite algue rouge de nos côtes.* — Dans l'aisselle d'une division de cette algue, on distingue de petites algues vertes et des diatomées, sortes d'êtres microscopiques dont la nature est mal déterminée et qui forment des figures rectangulaires réunies par un de leurs angles. Grossissement de 60 diamètres.

Fig. 5. *Fragment d'hépatique.* — Sorte de mousse dont la feuille est formée de deux couches superposées. L'une de ces couches est composée de cellules à parois épaisses et contenant quelques grains de couleur jaune-brunâtre. Au-dessus de cette couche on en voit une autre qui semble formée par des portions de grillage rapprochées les unes des autres. Grossissement de 250 diamètres.

Fig. 6. *Fragment de truffe* montrant deux capsules avec des *spores* ou corps reproducteurs, vus au grossissement de 350 diamètres. Le tissu de la truffe est formé de cellules pâles, enchevêtrées, au milieu desquelles, de place en place, se trouvent des *spores* contenus au nombre de deux ou trois dans des cellules plus grandes. Ces spores, hérissés de pointes, sont évidemment destinés à la reproduction de la truffe ; cependant on ne les a jamais vus germer, et on ignore quelles sont les conditions nécessaires pour qu'ils se développent en une truffe nouvelle.

Fig. 7. — *Grains de pollen.*

Fig. 8. *Fragment d'une fleur de giroflée* montrant les cellules remplies par deux matières colorantes dont les effets se combinent ; l'une est jaune et formée de granules, l'autre est violette, liquide. Grossissement de 350 diamètres.

Fig. 9. *Fragment de bois de cèdre* avec lequel sont faits ordinairement les crayons. Grossissement de 350 diamètres.

Fig. 10. *Coupe transversale du milieu d'une feuille de buis.* — Le centre est formé de fibres ligneuses coupées ici en travers ; sur les côtés, les cellules pleines de matière verte offrent une disposition différente vers le dessus et vers le dessous de la feuille. Dans cette dernière région, les cellules laissent entre elles des vides remplis d'air. — On peut distinguer de chaque côté une mince pellicule transparente qui recouvre de chaque côté le tissu de la feuille.

Planche XVII.

Fig. 1. *Globules rouges du sang* avec trois globules blancs, grossis 900 fois. C'est à la présence de ces corps, appelés *hématies* par les anatomistes, que le sang doit sa belle couleur rouge. Le liquide où ils sont en suspension est jaune-citron. Eux-mêmes, quand on les examine dans le champ du microscope à la lumière transmise, paraissent jaunes. Ils ont la forme de disques encavés sur leurs deux faces, et dès qu'ils sont sortis de la veine, on les voit se disposer en piles comme des pièces de monnaie. — Le diamètre exact des hématies chez l'homme est de 7 millièmes de millimètre. Près d'elles sont représentés trois globules blancs sphériques et d'une tout autre nature, mais qu'on trouve toujours mêlés aux éléments du sang.

Fig. 2. *Distribution du sang dans la substance cérébrale,* vue à un grossissement de 60 diamètres environ. Les dernières divisions des veines et des artères réduites à l'état de vaisseaux, appelés capillaires, quoiqu'ils soient beaucoup plus petits que le diamètre d'un cheveu, dessinent des mailles qui forment sous l'œil une élégante arabesque. Les plus fins de ces vaisseaux ont juste le diamètre nécessaire pour laisser passer une hématie.

Fig. 3. *Polycystines fossiles des Barbades,* à un grossissement de 60 diamètres environ. On trouve dans ces îles des couches entières de terrain qui sont formées par ces débris

élégants d'animaux microscopiques. Ce qui est curieux, c'est que ces coques, si artistement dessinées et qui constituent toute la partie solide de l'animal, se forment au milieu d'un tissu mou, n'ayant pas même de figure déterminée et qui enveloppe ces parties, calcaires ou siliceuses, si artistement découpées.

FIG. 4. *Fragment du tissu sous-jacent à la carapace*, chez une petite *écrevisse* longue de 2 centimètres environ et montrant deux sortes de pigments : l'un, d'un beau rouge, est contenu dans des cellules plus ou moins irrégulières et de forme rameuse. Ces cellules contiennent en leur milieu un ou deux noyaux qui se distinguent parce qu'ils sont incolores. Le pigment bleu est formé par des grains. Ces derniers sont toujours placés dans le voisinage immédiat de cellules rouges et il en résulte un contraste de couleur extrêmement remarquable dans le champ du microscope. Le grossissement est ici de 250 diamètres environ. Il résulte de là que, quand on n'emploie pas l'instrument grossissant, l'œil ne peut plus distinguer la cellule rouge des granules bleus qui l'entourent; il ne voit plus que l'ensemble, sous la forme d'une petite tache, grosse comme la pointe d'une aiguille et qui parait brune par le mélange de deux couleurs.

FIG. 5. *Fragment du tissu qui constitue les os*, vu au grossissement de 250 diamètres environ. L'espace vide qui est au milieu est destiné à livrer passage aux vaisseaux capillaires qui parcourent la substance osseuse. Autour de ces vaisseaux sont disposés d'autres espaces et d'autres conduits extrêmement fins (canalicules osseux), qui sont remplis pendant la vie, mais qui deviennent vides quand l'os se dessèche. Ils apparaissent alors comme on les voit représentés ici. Ces canalicules, extrêmement fins et communiquant les uns avec les autres, mesurent en général moins d'un demi-millième de millimètre de diamètre.

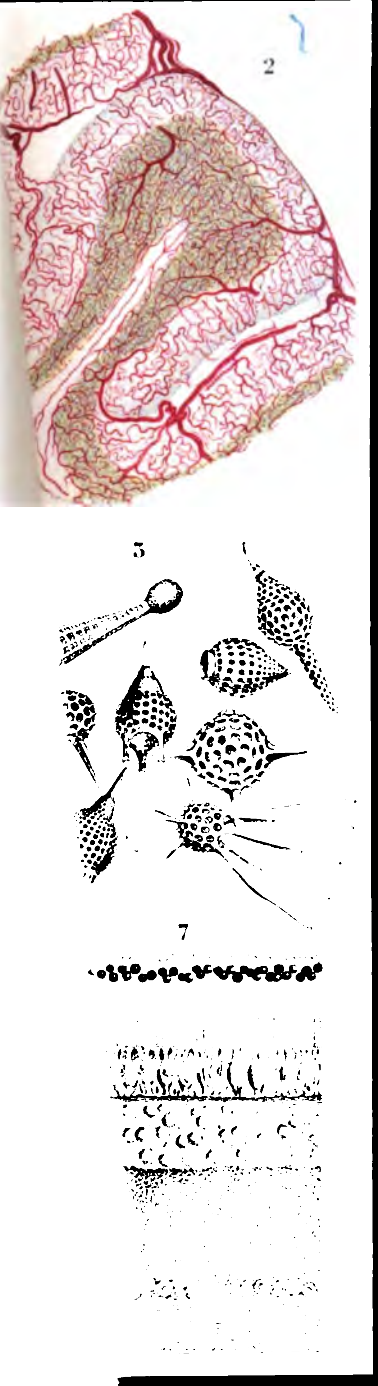
FIG. 6. *Animaux infusoires appartenant au genre kolpode*, grossis environ 900 fois. On distingue latéralement en avant l'orifice buccal et en arrière une vésicule jaune contractile qui présente des pulsations comme le cœur. Les corps bleuâtres qui avoisinent le cœur sont des *bouchées* d'aliments que l'animal a avalées et qui tombent dans l'intérieur de ses tissus, où elles sont digérées peu à peu, sans être reçues, comme chez les autres animaux, dans une cavité intestinale.

FIG. 7. *Coupe d'un fragment de la rétine d'un oiseau*, grossi 500 fois environ. La rétine est la membrane nerveuse extrêmement mince et délicate qui tapisse le fond de l'œil et qui est impressionnée par les rayons lumineux. Malgré son peu d'épaisseur, cette membrane présente, comme on peut le voir, une structure extrêmement complexe, et l'on n'y compte pas moins de sept ou huit couches distinctes.

Chez les oiseaux et les reptiles, la rétine présente une série de gouttes colorées qui apparaissent à peu près vers le même rang comme autant de perles. La région où se trouvent celles-ci est la partie de la rétine sensible par excellence, et cette partie est en même temps celle qui est immédiatement appliquée contre le fond de l'œil, en sorte que les rayons lumineux venant du dehors doivent traverser pour l'impressionner toute l'épaisseur de la rétine.

En lisant la note relative à la figure 3 de la planche XV, on voit que les cristaux de santonine, dont cette figure donne l'aspect, ont été étudiés à l'aide de la lumière polarisée. L'emploi de cette lumière a pour objet de mettre en évidence certaines propriétés particulières aux corps soumis à l'examen microscopique. Pour transformer un microscope ordinaire en microscope polarisant, on dispose au-dessous de la platine du microscope un petit prisme de Nicol qui est le *polariseur;*

PLANCHE XVII



Picart sc.

...ng dans la substance
... d'une carapace d'écre
...900 d. 7 Fragment de la



G Pouchet invᵗ Th Deyrolle del. Picart sc.

LE MICROSCOPE

Appliqué à l'étude des Animaux

1 Globules de sang ou hématies, grossissement, 900 d. _ 2 Distribution du sang dans la substance cérébrale 60 d. _ 3 Polycystines fossiles des Barbades. 60 d. _ 4 Tissu sous jacent d'une carapace d'écrevisse. 250 d. _ 5 Fragment de tissu osseux. 250 d. _ 6 Infusoires du genre Kolpode 900 d. _ 7 Fragment de la rétine d'un oiseau. 500 d.

d'autres mettent une pile de glaces jouant le même rôle. Un autre prisme de Nicol, plus fort que le premier, se place au-dessus de l'oculaire ou au-dessous de la première lentille ; ce prisme sert d'*analyseur*. En le faisant tourner sur lui-même, on produit dans les objets examinés, cristaux à un ou deux axes, ou autres substances biréfringentes, des effets de coloration remarquables, qui permettent de distinguer très nettement tous les détails de ces substances, tandis qu'à la lumière réfléchie ordinaire, ces détails se distinguent difficilement.

§ 6. CHAMBRE NOIRE. — MÉGASCOPE. — LANTERNE MAGIQUE.

Avant d'aborder la description du télescope, qui va faire l'objet du chapitre suivant, nous allons passer en revue quel-

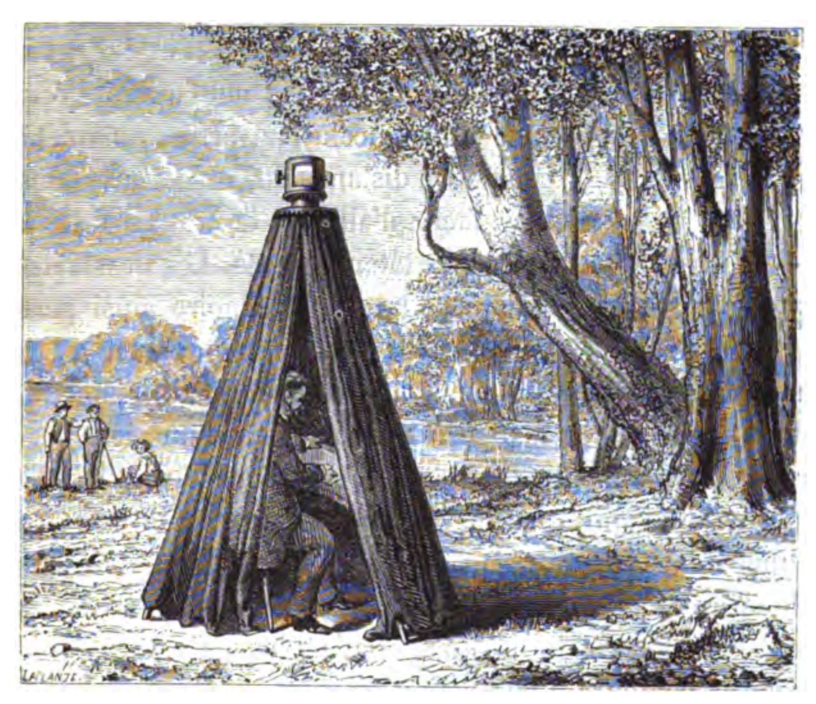


Fig. 293. — Chambre noire.

ques appareils qui ont la plupart un intérêt de curiosité et qu'à ce titre on ne manque jamais de mentionner dans les ouvrages de physique amusante, mais qui rendent cependant parfois de

véritables services à la science : ce sont notamment la *chambre noire*, la *chambre claire*, le *mégascope*, la *lanterne magique* et le *phantascope*.

Nous avons déjà vu, en parlant de la propagation de la lumière en ligne droite, que si, dans le volet d'une chambre parfaitement close, on perce un petit trou, l'image des objets extérieurs vient se former sur un écran. Cette image renversée n'est bien nette que pour les objets éloignés.

Pour obvier à cet inconvénient et donner plus d'éclat aux images, un physicien du dix-septième siècle, Porta, eut l'idée de recevoir la lumière sur un miroir sphérique concave qui réfléchissait les rayons et l'image sur un écran. Mais il obtint des effets beaucoup plus remarquables en adaptant au trou du volet une lentille convergente. L'image des objets extérieurs vint se peindre alors avec netteté sur l'écran, dont la distance à l'ouverture du volet dépend de la distance des objets eux-mêmes. Il est facile d'ailleurs de trouver cette distance par tâtonnements. Les dessinateurs emploient la chambre noire ainsi perfectionnée pour tracer sur un papier les contours du paysage qu'ils veulent reproduire. On lui donne alors la forme qu'indique la figure 293. Au lieu d'une lentille, on emploie un prisme (fig. 294) dont la face tournée vers les objets est convexe et qui, par la réflexion totale sur sa face plane inclinée de 45 degrés, renvoie les faisceaux de lumière sur la table où est placé le papier blanc. Là, l'image se forme avec toute sa netteté, et le dessinateur n'a plus qu'à en suivre au crayon les contours. Cette modification de la chambre noire est due à l'opticien C. Chevalier.

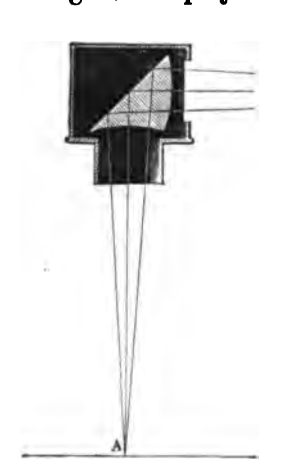


Fig. 294.— Lentille-prisme de la chambre noire.

On a donné le nom de *chambre claire* à un instrument qui projette sur le papier où l'on veut dessiner, l'image d'un objet, d'un paysage par exemple. Comme on vient de le voir, la

chambre claire a le même usage que la chambre noire, et c'est la seule raison de cette similitude de dénomination. En effet la chambre claire est formée simplement d'un prisme réfringent de forme quadrangulaire, dont le principe est celui de la réflexion totale des rayons lumineux à son intérieur.

Deux des faces, *ab*, *bc*, sont à angle droit; les deux autres sont inclinées de 135°, de sorte que les autres angles mesurent chacun 67° 30′. Si donc un rayon lumineux *u* traverse la face verticale du prisme (fig. 295) et va frapper en *r* la face *cd*, son incidence avec la normale à cette dernière sera de 67° 1/2, c'est-à-dire de beaucoup supérieure à l'*angle limite;* le rayon se réfléchira donc totalement, tombera ensuite sur *ad* où il se

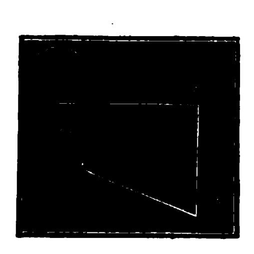


Fig. 295. — Chambre claire; marche d'un rayon lumineux dans le prisme.

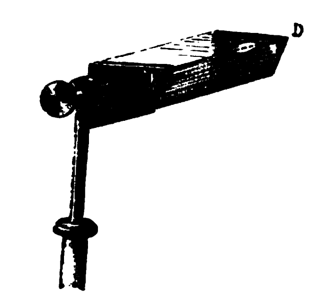


Fig. 296. — Chambre claire montée sur son pied.

réfléchira de la même manière, et enfin sur la face supérieure horizontale qu'il traversera normalement.

L'œil de l'observateur situé en *pp*, à peu de distance de l'angle du prisme, recevra ainsi tous les faisceaux lumineux émanés des objets et en verra l'image projetée verticalement. En plaçant un papier au-dessous du prisme, il sera facile à l'observateur de voir à la fois sur le papier l'image virtuelle des objets extérieurs et la pointe de son crayon, à l'aide de laquelle il pourra suivre tous les contours de ceux-ci.

La figure 296 montre la chambre claire disposée sur un pied qui permet de la fixer au bord de la planchette que le dessinateur pose sur ses genoux; on y voit taillée dans l'arête DD une échancrure qui permet d'appliquer l'œil sur l'arête même.

Le *mégascope* est une chambre noire imaginée pour permettre la reproduction sur une échelle agrandie d'un objet quelconque, statuette, tableau, etc. La figure 297 nous dis-

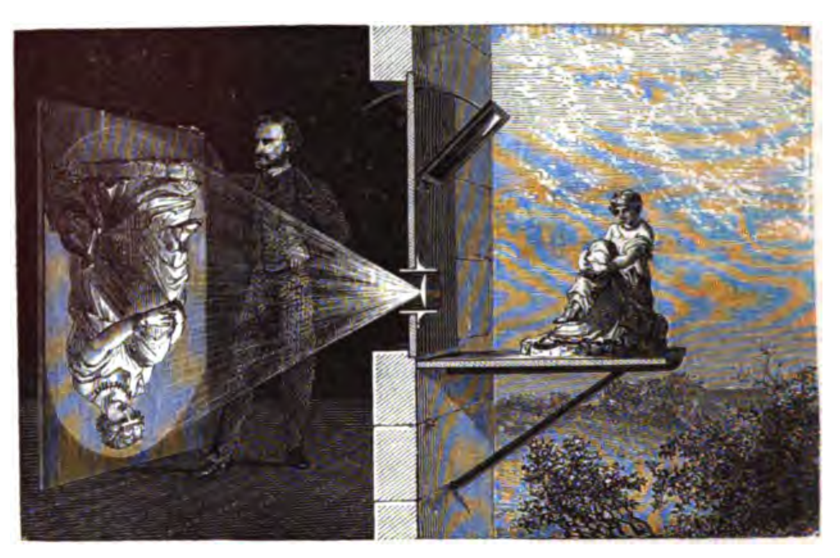


Fig. 297. — Mégascope.

pensera d'une description détaillée; nous dirons seulement que, l'éclat de l'image étant affaibli par la dispersion due à l'agrandissement, on se sert d'un miroir pour envoyer les rayons du Soleil sur l'objet, et obtenir un éclairement suffisamment intense.

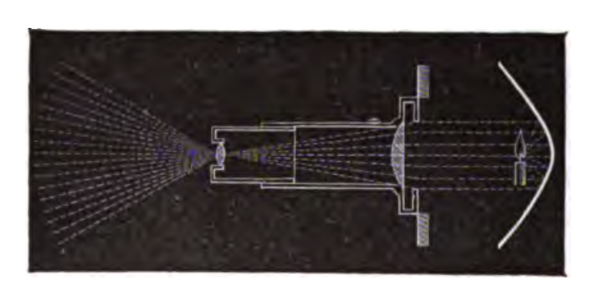


Fig. 298. — Lanterne magique.

La *lanterne magique* est un mégascope dans lequel les objets sont éclairés par la lumière d'une lampe à réflecteur. A l'aide de cet appareil, on projette sur un écran les images agrandies de dessins peints sur verre avec des couleurs translucides. Le tube, en travers duquel on place ces dessins renversés, renferme un système de deux lentilles, l'une plan-convexe, l'autre biconvexe, qui donnent une image droite reçue sur un écran placé en avant de l'instrument.

En employant la lumière Drummond pour éclairer les objets, on obtient des images beaucoup plus vives ; et dès lors, en éloignant l'écran et rapprochant les lentilles, on obtient un agrandissement beaucoup plus fort.

Vers la fin du siècle dernier, un physicien belge, Robertson, obtint un succès extraordinaire en montrant au public des apparitions de fantômes, qui, dans l'obscurité profonde où se trouvaient les spectateurs, semblaient s'avancer peu à peu et grandir jusqu'au milieu de la salle. L'illusion de ces scènes était obtenue au moyen d'un appareil nommé *phantascope*, tout à fait analogue à la lanterne magique, c'est-à-dire formé d'une caisse renfermant une lampe à réflecteur, d'un tube avec le même système de deux lentilles projetant l'image d'un dessin sur un écran placé en avant de l'instrument. Seulement, la lanterne est supportée par une table roulante, dont l'un des pieds porte une poulie, qui communique son mouvement à la lentille objectif par l'intermédiaire d'un excentrique et d'un levier. Quand la table roule en s'éloignant de l'écran, l'objectif se rapproche peu à peu de la demi-boule, l'image grandit, et l'illusion est produite, d'autant plus complète, qu'à l'aide d'un diaphragme mobile la lumière que reçoit l'image varie proportionnellement à sa grandeur.

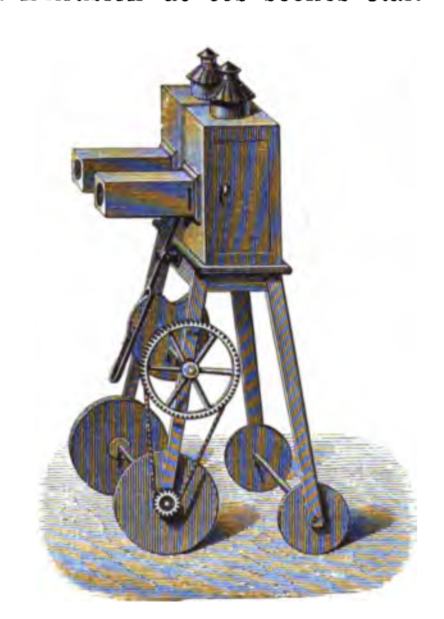


Fig. 299. — Phantascope.

Robertson, qui devait, paraît-il, le secret de cette invention à un artiste nommé De Waldech, avait soin d'écarter toute lumière étrangère, tout bruit de l'appareil, dont les roues étaient garnies d'étoffe. De là une illusion qu'il augmentait encore en imitant le bruit du tonnerre, de la pluie, les cris des animaux, etc.

Dans la figure 299, on peut voir qu'il y a une double lanterne. On peut dès lors projeter sur l'écran, outre l'image du spectre ou de tout autre personnage fantastique, celle d'un paysage en harmonie avec la scène à produire.

Le même double appareil donne aussi les vues *polyoramiques :* on entend par là des effets de paysage variés, la succession du jour à la nuit, d'une mer calme à la tempête, etc. Chaque lanterne est disposée de manière à projeter chaque double vue au même endroit de l'écran. L'une d'elles est d'abord fermée et l'on voit le paysage éclairé par le Soleil ; peu à peu la lumière s'affaiblit, le crépuscule arrive, puis la nuit, et, insensiblement, la seconde vue s'est substituée à la première. Les enfants, on peut dire aussi les grandes personnes, prennent souvent plaisir à admirer ces tableaux et ces effets de lumière. Comme ici c'est le principe qui nous intéresse plutôt que les détails des mécanismes imaginés pour en tirer parti, nous insistons seulement sur ce point que la chambre noire, les mégascopes, lanternes magiques, phantascopes sont tous basés sur la formation d'images réelles par l'intermédiaire de lentilles convergentes.

CHAPITRE IV

LE TÉLESCOPE

§ 1. LES LUNETTES. — LUNETTE DE GALILÉE. — ACHROMATISME.

Le microscope nous permet de pénétrer dans les mystères de l'infiniment petit; il met à la portée de la vue humaine les objets les plus infimes, et fait voir d'une manière distincte les mille détails qui envoient à l'œil nu une lumière trop faible pour impressionner la rétine.

Ce que le microscope fait pour les objets à notre portée, mais trop petits, le télescope le réalise avec une pareille puissance pour les objets que leur éloignement rend invisibles, quelles que soient leurs réelles dimensions. Il sonde les profondeurs de l'espace et rend accessibles à la vue des astres dont l'homme, sans son secours, n'eût pas même soupçonné l'existence. Il rapproche ceux qu'on peut observer à la vue simple, et alors ce sont les détails de leur structure qu'il révèle à la science, multipliant ainsi pour notre curiosité les objets que la nature offre à l'observation, et à l'aide desquels l'intelligence humaine parvient à découvrir ses lois.

Le nom de télescope est tiré du grec comme celui de microscope; l'un et l'autre ont pour racine commune le mot σκοπέω (*scopeô*, je regarde); μικρὸς (micros) signifie *petit*, et τῆλε (*tèle*) *au loin*. L'étymologie permet donc d'appliquer le nom de télescope à tous les instruments qui ont pour effet de rapprocher les objets éloignés en amplifiant leur image. Mais en France on

a coutume de réserver le nom de *lunettes* aux télescopes exclusivement réfracteurs, c'est-à-dire formés uniquement de certaines combinaisons de verres ou de lentilles : tandis que le nom de *télescopes* s'applique plus spécialement aux instruments dans lesquels entre un miroir ou réflecteur ; on dit quelquefois alors de ces derniers que ce sont des télescopes *catadioptriques*. Nous nous conformerons ici à l'usage, qui cependant n'est guère justifié, et nous décrirons successivement et séparément les lunettes et les télescopes.

A quelle date remonte l'invention des lunettes ? L'inventeur de ce merveilleux instrument d'investigation terrestre et céleste est-il parfaitement connu ?

A ces questions, les érudits ne font que des réponses douteuses, comme pour mainte autre découverte scientifique. Seulement, ici, on peut être assuré que la prétention de faire remonter la découverte des lunettes grossissantes à l'antiquité et même au moyen âge n'est fondée sur rien de sérieux [1]. C'est vers la fin du seizième siècle qu'on trouve la première mention, faite par Porta, de la possibilité de combiner deux lentilles, l'une concave, l'autre convexe, « pour voir agrandis et distincts tant les objets voisins que les objets éloignés ». Mais c'est un opticien de Middelbourg, Jean Lippershey, qui réalisa le premier cette combinaison et construisit la première lunette télescopique (1606). Jacques-Adrien Métius en 1608 et Galilée en 1609 paraissent avoir trouvé eux-mêmes la solution du problème d'optique indiqué par Porta ; mais il faut dire que le grand

1. Nous ne voulons parler ici que des lunettes composées. Les *lunettes simples* ou *besicles* qui sont formées, pour chaque œil, d'un seul verre, d'une lentille convergente ou divergente à long foyer, étaient connues depuis longtemps. On en fait remonter l'invention au quatorzième siècle, sans qu'on puisse avec certitude en désigner le véritable inventeur. Suivant certains historiens, cet inventeur serait un sieur Salvino Armato de Florence, dont le tombeau portait cette épitaphe :

Qui giace
Salvino d'Armato degli Armati
di Firenze
INVENTOR DEGLI OCCHIALI
Dio li perdonie a peccata
anno D MCCC XVII.

physicien et astronome de Florence avait eu connaissance de la découverte de Lippershey, sans du reste avoir eu, paraît-il, aucun renseignement précis sur l'instrument lui-même.

Maintenant, comment l'opticien hollandais était-il arrivé au but? Là, on ne sait rien de positif; ce qui le prouve, c'est qu'il y a deux versions, deux légendes différentes sur ce sujet. Rapportons-les toutes deux d'après Arago.

« Hieronimus Sirturus, dit-il, rapporte qu'un inconnu, *homme* ou *génie*, s'étant présenté chez Lippershey, lui commanda plusieurs lentilles convexes et concaves. Le jour convenu, il alla les chercher, en choisit deux, l'une concave, la seconde convexe, les mit devant son œil, les écarta peu à peu l'une de l'autre, sans dire si cette manœuvre avait pour objet l'examen du travail de l'artiste ou toute autre cause, paya et disparut. Lippershey se mit incontinent à imiter ce qu'il venait de voir faire, reconnut le grossissement engendré par la combinaison des deux lentilles, attacha les deux verres aux extrémités d'un tube et se hâta d'offrir le nouvel instrument au prince Moritz de Nassau.

« Suivant une autre version, les enfants de Lippershey, en jouant dans la boutique de leur père, s'avisèrent de regarder au travers de deux lentilles, l'une convexe, l'autre concave; ces deux verres, s'étant trouvés à la distance convenable, montrèrent le coq du clocher de Middelbourg grossi ou notablement rapproché. La surprise des enfants ayant éveillé l'attention de Lippershey, celui-ci, pour rendre l'épreuve plus commode, établit d'abord les verres sur une planchette ; ensuite il les fixa aux extrémités de deux tuyaux susceptibles de rentrer l'un dans l'autre. A partir de ce moment, *la lunette était trouvée.* » (*Astronomie populaire*, d'après un mémoire d'Olbers.)

Une lunette se compose, comme le microscope composé, de deux parties essentielles, de deux systèmes de lentilles. L'un, tourné vers l'objet, se nomme, pour cette raison, l'*objectif:* c'est ordinairement une lentille biconvexe, à long foyer, qui produit une image réelle et renversée de l'objet. A l'autre sys-

tème de lentilles s'adapte l'œil ; il se nomme l'*oculaire* : c'est en somme, une loupe simple ou composée, à l'aide de laquelle on examine l'image qui se trouve ainsi agrandie dans une certaine mesure.

L'oculaire des premières lunettes était, comme on l'a vu plus haut, une lentille biconcave ; l'image renversée formée par l'objet se trouve redressée dans ce système, ainsi qu'on peut s'en rendre compte par la marche des rayons lumineux et la formation des images que représente la figure 500. L'objectif O considéré isolément fournit à son foyer, qui, pour les objets très éloignés, est le foyer principal de la lentille, une image réelle *ba* de l'objet observé. Cette image est, nous l'avons dit, renversée, comme on pourrait s'en assurer en la recevant sur un écran. L'oculaire biconcave O', placé entre l'image et l'objectif, fait diverger les faisceaux lumineux avant qu'ils aillent se réunir au foyer, et empêche ainsi la formation de l'image réelle. Pour l'œil, où pénètrent ces faisceaux après leur sortie de l'oculaire, ils semblent donc venir des points A' et B' situés sur leurs axes optiques à leurs points de convergence. De là une image virtuelle redressée, A'B', qui paraît nette si les lentilles sont disposées de façon que cette image se forme à la distance de la vision distincte.

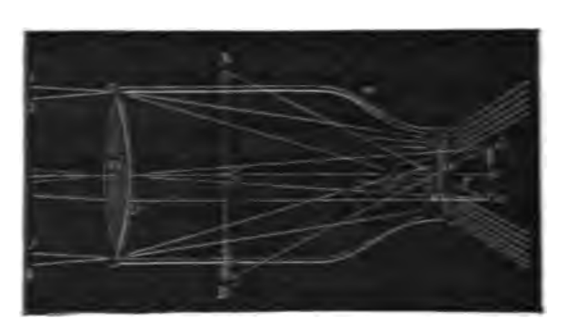


Fig. 500. — Marche des rayons lumineux dans la lunette de Galilée.

Il y a une différence essentielle entre le grossissement des lunettes et le grossissement des microscopes. Dans ces derniers instruments, l'image agrandie est plus grande en réalité que l'objet lui-même, c'est-à-dire que l'angle sous-tendu par l'image est plus grand que l'angle sous-tendu par l'objet, l'image et l'objet étant supposés tous deux à la même distance

de l'œil. Dans les lunettes au contraire, et ceci s'applique à tous les genres de télescopes, l'image est toujours inférieure en dimensions à l'objet lui-même; mais elle est plus grande que l'image fournie par la vue simple, et c'est dans cette amplification que consiste le grossissement des lunettes.

Ainsi, avec deux lentilles seulement, la lunette que nous venons de décrire, et qui a reçu le nom de *lunette de Galilée*, montre les objets *droits* en même temps qu'elle les rapproche ou les agrandit.

Les premières lunettes de Galilée ne donnaient qu'un grossissement assez faible, de 4 à 7 fois en diamètre ; la plus puissante qu'ait construite et employée l'illustre astronome grossissait 32 fois. Cela lui suffit pour faire une multitude de découvertes qui passèrent alors, à juste titre, pour merveilleuses : les montagnes de la Lune, les taches et le mouvement de rotation du Soleil, les satellites de Jupiter et les phases de Vénus, la décomposition en étoiles de la grande nébuleuse qu'on nomme Voie lactée, etc. Son *Messager céleste* (*Nuntius sidereus*) qu'il publia pour faire connaître aux hommes de science les résultats de ses recherches, suffisait à peine à enregistrer ces découvertes, qui constituèrent bientôt une branche de l'astronomie inconnue des anciens : l'*astronomie physique*.

Aujourd'hui, la lunette de Galilée n'est plus guère usitée en astronomie, son grossissement étant trop faible ; mais on l'utilise comme lunette terrestre et surtout pour l'examen des objets peu éloignés : ce n'est autre chose que la *lorgnette de spectacle*, très commode parce que, à grossissement égal, elle est d'une longueur beaucoup moindre que les lunettes à oculaire convergent. Du reste, cette longueur doit pouvoir varier selon les vues, c'est-à-dire selon la distance de la vision distincte pour chaque observateur. A cet effet, l'oculaire est adapté à un tube qui est mobile dans le tube renfermant l'objectif ; un bouton qui engrène avec une crémaillère permet de faire varier insensiblement la distance des verres et de les placer de façon à obtenir une parfaite netteté de l'image : c'est ce qu'on nomme

mettre au point. Les myopes doivent raccourcir la lunette et les presbytes l'allonger pour voir distinctement.

Le grossissement, dans les lunettes de Galilée, est égal au rapport de la distance focale principale de l'objectif à celle de l'oculaire.

Le champ est peu étendu, et, comme les rayons sortent de l'oculaire en divergeant, il faut placer l'œil très près de l'instrument pour ne pas diminuer encore cette étendue.

C'est le moment de dire un mot du perfectionnement apporté, vers le milieu du dernier siècle, à la construction des lunettes par un opticien anglais, d'origine française[1], Dollond. Nous voulons parler de l'achromatisme des lentilles, dont il a été question déjà quand nous avons décrit le microscope.

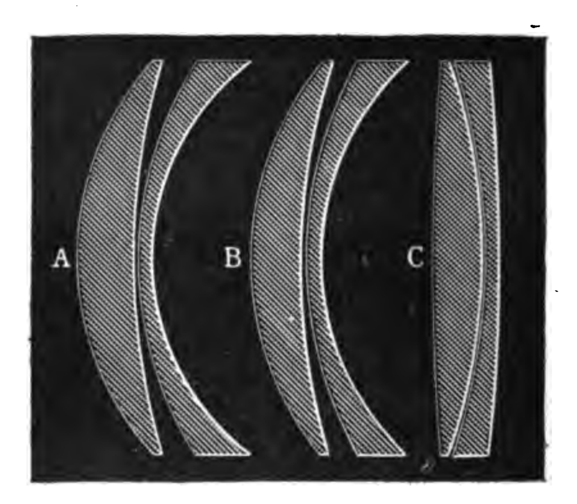


Fig. 301. — Lentilles achromatiques. Objectifs de Gauss et d'Herschel.

Quand un rayon de lumière blanche est réfracté par une lentille, les rayons colorés dont il se compose n'ayant point le même indice de réfrangibilité sont *dispersés*, d'où il résulte, sur les bords des images formées, une coloration ou irisation qui offre un grave défaut au point de vue de la netteté et de la vérité des images. Cette dispersion consiste en ce que chacun des rayons colorés a un foyer distinct situé à une distance de la lentille qui dépend de la réfrangibilité du rayon. C'est ce défaut qu'on nomme *aberration de réfrangibilité*, et que Dollond a trouvé moyen de faire disparaître en composant les objectifs et les oculaires des instruments d'optique de deux ou

1 Dollond était issu d'une famille française protestante que la Révocation de l'édit de Nantes força de se réfugier en Angleterre.

plusieurs lentilles différentes, soit convergentes, soit divergentes, et en variant la nature du verre dont ces lentilles sont formées.

En formant la lentille convergente avec le verre ordinaire de nos glaces (*crown-glass*), et la lentille divergente biconcave ou planconcave avec le cristal composé de verre où entre une certaine quantité de plomb (*flint-glass*) ; enfin, en donnant aux courbures de ces lentilles appliquées l'une sur l'autre des valeurs que fournit le calcul ou l'expérience, Dollond fabriqua des systèmes de lentilles *achromatiques*, c'est-à-dire telles que les rayons de lumière blanche, tout en se réfractant dans le sens voulu, conservaient leur parallélisme au sortir de la lentille, en un mot, n'étaient point dispersés. Depuis, on a varié de bien des manières les combinaisons propres à donner des systèmes achromatiques. Dans tout instrument soigneusement construit, on arrive ainsi à supprimer, ou à atténuer au moins considérablement, le défaut de l'aberration de réfrangibilité.


Fig. 302. — Lorgnette de spectacle avec objectif et oculaire achromatiques.

Dans la lunette de Galilée, l'achromatisme résulte déjà, en partie, de cette circonstance que l'oculaire est divergent, tandis que l'objectif est une lentille convergente. En ayant soin de faire l'oculaire en flint-glass et l'objectif en crown-glass, on aurait l'achromatisme pour le système ; mais alors les courbures des lentilles ne permettraient qu'un grossissement très restreint, en général insuffisant. On préfère donc employer des lentilles où l'achromatisme est obtenu séparément.


Fig. 303. — Lorgnette jumelle ou binoculaire.

La figure 302 représente une lorgnette de spectacle ; on

voit quelle est la combinaison adoptée pour l'oculaire et pour l'objectif. Ce dernier est formé d'une lentille biconcave en flint renfermée entre deux lentilles convexes en crown, tandis que l'oculaire est une lentille convexe en flint interposée entre deux lentilles concaves en crown. D'autres fois, l'on achromatise l'objectif seul, et la courbure de l'oculaire est calculée de façon à accroître le grossissement.

§ 2. LUNETTE ASTRONOMIQUE.

Arrivons maintenant à la *lunette astronomique*. On réserve ce nom au télescope réfracteur généralement employé aujourd'hui dans les observations astronomiques. La lunette astronomique consiste essentiellement en un système de deux lentilles convergentes : l'une, l'objectif, donnant l'image réelle et renversée de l'objet ; l'autre, l'oculaire, amplifiant la première, mais lui conservant sa position renversée. Il va sans dire que les deux lentilles sont elles-mêmes composées de façon à produire l'achromatisme des images. Suivons, à l'aide de la figure 304, la marche des rayons lumineux dans la lunette astronomique, et nous verrons aisément en quoi elle diffère de la lunette de Galilée.

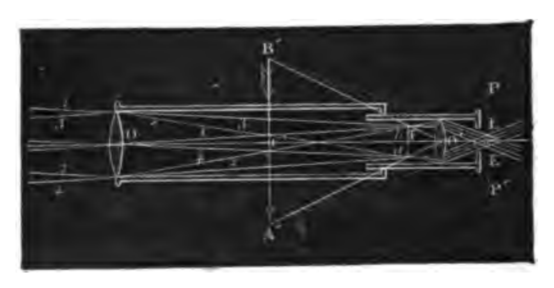
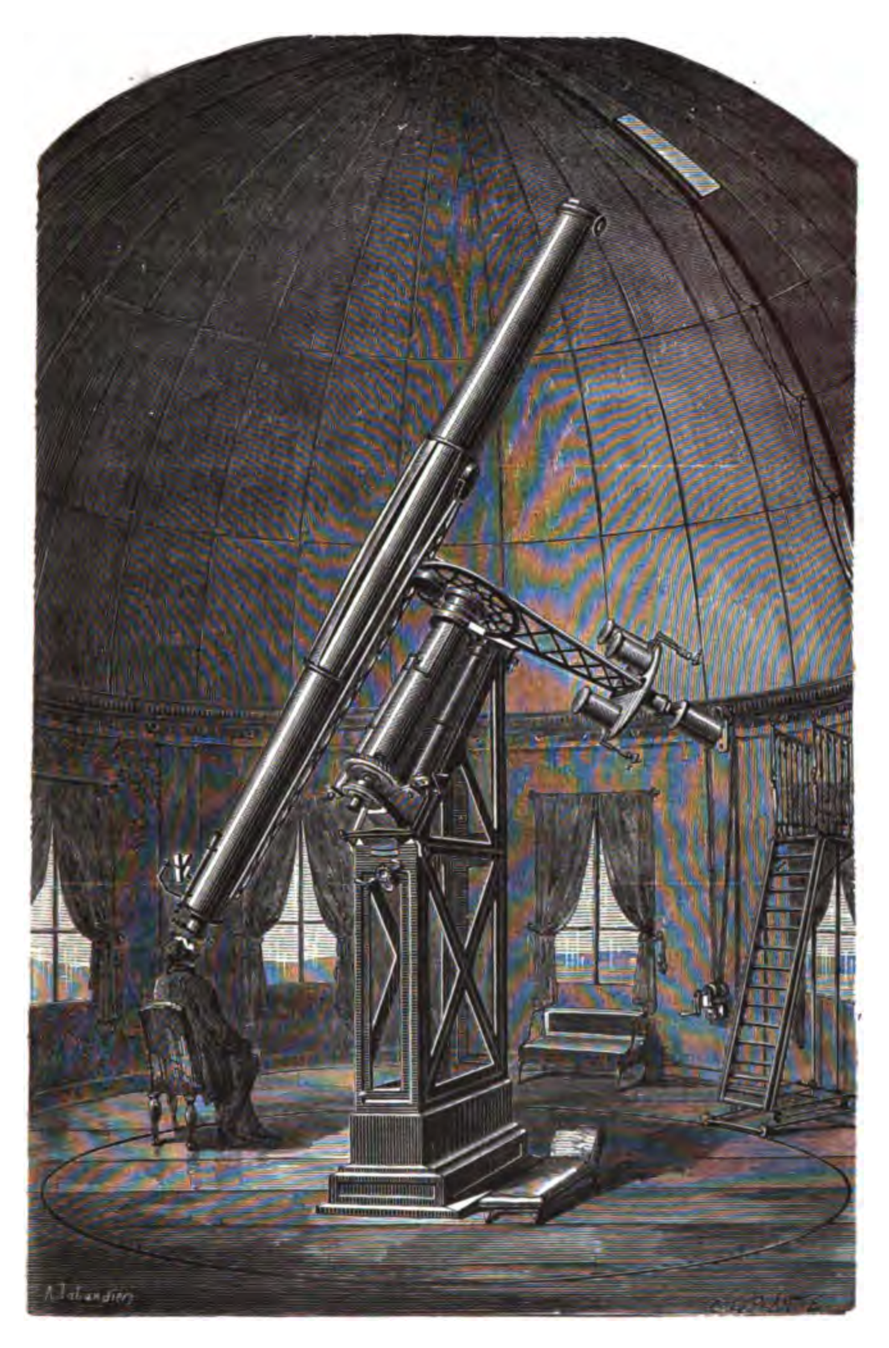


Fig. 304. — Marche des rayons lumineux dans la lunette astronomique.

Les rayons partis de l'extrémité supérieure de l'objet, qu'on suppose situé à une distance infinie, forment un faisceau parallèle 1, 2, en arrivant à l'objectif O. En sortant de ce dernier, où ils se réfractent, ils vont former par leur convergence en *a* une image de cette extrémité. De même le faisceau 3, 4, émané de la partie inférieure, donne lieu à une image réelle *b*. Il se



GRANDE LUNETTE ÉQUATORIALE
de l'Observatoire de Paris.

forme en définitive une image renversée et réelle de l'objet à la distance focale principale de l'objectif, en *ab*. C'est cette image que la loupe ou l'oculaire O' permet de voir agrandie, mais toujours renversée en A'B', c'est-à-dire à une distance de l'œil égale à la distance de la vision distincte.

Comme dans la lunette de Galilée, le grossissement est égal au rapport qui existe entre les distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire. Ainsi, plus l'objectif est une lentille à long foyer et plus le foyer de l'oculaire est court, plus le grossissement linéaire de la lunette est considérable. Il ne s'agit ici que des lunettes où l'oculaire est formé d'une seule lentille achromatique ou non. La valeur du grossissement s'exprime par une autre formule quand l'oculaire est composé d'un système de lentilles.

Les figures 305 et 306 montrent quelle est la disposition inté-

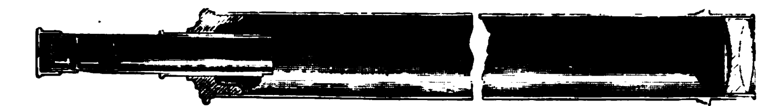


Fig. 305. — Coupe de la lunette astronomique.

rieure de la lunette astronomique, et comment on la monte sur un pied pour rendre l'usage et l'observation commodes.

L'oculaire est formé de deux lentilles planconvexes séparées par un diaphragme et adaptées à un tuyau mobile dans le grand tuyau qui porte l'objectif. Les deux lentilles de l'oculaire peuvent être disposées de façon que leurs surfaces convexes soient tournées l'une vers l'autre : dans ce cas, elles sont placées au delà de l'image qui se produit au foyer de l'objectif. C'est alors l'*oculaire positif*, imaginé par Ramsden. Huygens disposait les deux lentilles de sorte que leurs faces planes fussent toutes deux tournées vers l'œil (fig. 305), et c'est entre elles que tombe alors le foyer de l'objectif. C'est l'*oculaire négatif*.

A l'aide d'un bouton extérieur, on enfonce plus ou moins le tube de l'oculaire, de façon à le *mettre au point*, c'est-à-dire

dans la position où l'image se forme parfaitement distincte, ce qui dépend à la fois du grossissement employé, de la vue de l'observateur, et enfin, pour les objets dont la distance est comparativement rapprochée, de l'éloignement de ces objets mêmes. Pour tous les objets célestes, dont la distance peut être considérée comme infinie, la mise au point est seulement relative au grossissement, c'est-à-dire à l'oculaire employé et à la vue de l'observateur, laquelle peut être normale, myope ou presbyte[1].

A l'instrument est adapté un chercheur, petite lunette fixée parallèlement à la lunette principale et munie, à son foyer, de deux fils croisés à angle droit. Le grossissement de la lunette étant un peu fort, le champ est très limité, de sorte qu'en se servant de la lunette principale pour viser un objet, on a quelque difficulté à amener cet objet dans le champ de la lunette. Le champ du chercheur étant comparativement très grand, on y trouve facilement l'objet, on l'amène au point de croisée des fils et on est assuré que l'objet observé ou du moins sa partie centrale est en ce moment dans le champ de la lunette principale.



Fig. 306. — Lunette astronomique avec chercheur, montée sur un pied ordinaire.

La grande lunette porte elle-même un système de fils réticulaires mobiles, dont on règle la position de façon que l'image des fils soit nette, ce qui arrive quand le réticule est à la dis-

1. Il résulte de là que la valeur du grossissement, dont nous avons plus haut donné l'expression, varie un peu avec les différentes vues des observateurs. Au lieu du rapport entre les distances focales de l'objectif et de l'oculaire, qui convient au cas idéal où l'œil serait accommodé pour voir nettement les objets situés à l'infini, il faut prendre le rapport de la distance focale de l'objectif à la distance où la mise au point marque la position de l'oculaire.

tance de la vision distincte. C'est en ce même point que doit se trouver l'image réelle formée par l'objectif; et on y parvient, comme nous venons de le dire plus haut, en enfonçant plus ou moins le tube porte-oculaire.

Les lunettes à long foyer des observatoires astronomiques sont d'un poids qui rend le maniement de ces instruments difficile. On leur adapte alors une monture plus compliquée, et, par l'intermédiaire d'engrenages et de tringles que nous n'avons

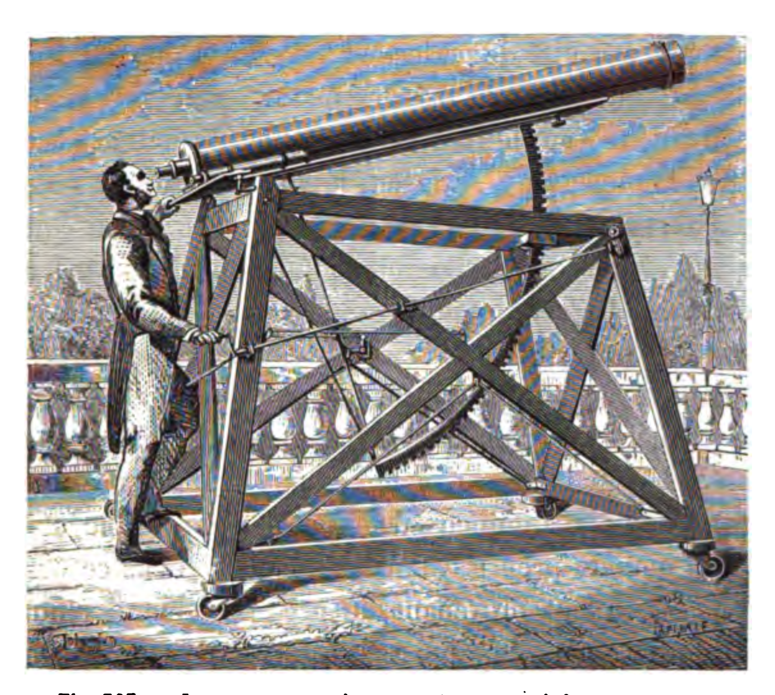


Fig. 307. — Lunette astronomique montée sur un pied à engrenages.

point à décrire ici, on parvient à leur imprimer tous les mouvements nécessaires avec la lenteur et la précision convenables.

D'après ce que nous avons dit plus haut du grossissement d'une lunette astronomique, il semble qu'il dépende, pour un même instrument, ou mieux pour un même objectif, de l'oculaire. Et, en effet, une même lunette peut être susceptible de donner des grossissements variables par l'emploi d'oculaires différents, à foyers plus ou moins courts. Théoriquement parlant, la puissance d'une lunette semblerait donc illimitée; mais,

à la vérité, elle dépend d'autres éléments dont nous allons dire un mot.

La qualité d'une lunette et sa puissance dépendent principalement de l'objectif. Il est indispensable d'abord que la matière qui le compose soit aussi pure que possible, que les verres des lentilles soient exempts de bulles et de stries. La taille et le polissage de la surface ont une importance non moins grande, et c'est de leur perfection que dépend surtout la netteté de l'image réelle que l'objectif forme à son foyer.

Maintenant, à égalité de perfection à ces divers points de vue, l'objectif qui supportera le grossissement le plus fort sera celui dont le diamètre sera le plus considérable, et dont la distance focale sera la plus grande. En effet, la clarté de l'image virtuelle dépend d'abord de l'éclat de l'image réelle, et, par conséquent, de la quantité des rayons lumineux qui contribuent à former cette dernière. Or cette quantité est en rapport direct avec la grandeur ou l'ouverture de l'objectif. Comme le grossissement de l'oculaire éparpille les rayons sur un plus grand espace, l'image virtuelle est d'autant plus affaiblie et confuse que ce grossissement est plus fort, à moins que les rayons ne proviennent d'un point lumineux de dimension insensible et brillant d'une lumière propre comme les étoiles. Dans ce dernier cas, l'affaiblissement provenant du grossissement est nul, et l'éclat est accru dans le rapport des carrés des ouvertures de l'objectif et de la pupille de l'œil. Aussi, avec une lunette d'une grande ouverture, le nombre des étoiles qu'on peut apercevoir dans une étendue limitée du ciel s'agrandit-il considérablement, comme le prouvent les figures 308 et 309. L'une montre un coin du ciel pris dans la constellation des Gémeaux, où les étoiles, vues à l'œil nu, sont au nombre de sept; à l'aide d'une lunette de 27 centimètres d'ouverture, M. Chacornac y a compté 3205 étoiles. En admettant 6 millimètres pour l'ouverture de la pupille, l'éclat se trouvait en effet augmenté dans le rapport de 36 à 72 900 ou de 1 à 2025, abstraction faite de l'absorption de la lumière par la matière des lentilles.

GRANDE LUNETTE MÉRIDIENNE
de l'Observatoire de Paris.

Ainsi encore s'explique la possibilité de distinguer en plein jour, avec les lunettes, des étoiles qu'on ne peut voir à l'œil nu que le soir ou pendant la nuit.

Les astres non lumineux par eux-mêmes, comme la Lune, les planètes, ont, dans les lunettes astronomiques, un éclat moindre qu'à l'œil nu, et il en résulte que le pouvoir grossissant est limité pour un objectif donné.

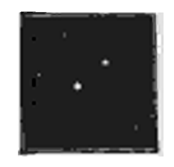


Fig. 308. — Un coin de la constellation des Gémeaux.

Parmi les plus remarquables et les plus puissantes lunettes astronomiques aujourd'hui connues, il faut citer celles des observatoires de Paris et de Poulkova, qui ont 38 centimètres d'ouverture



Fig. 309. — La même partie du ciel vue avec une lunette de 27 centimètres d'ouverture.

et 8 mètres de foyer, et la lunette de l'observatoire de Cambridge (États-Unis), dont l'ouverture mesure 47 centimètres.

Ce dernier instrument est le plus grand télescope réfracteur qu'on ait construit jusqu'à présent[1].

§ 3. LUNETTE TERRESTRE OU LONGUE-VUE.

C'est à Képler qu'on doit la découverte théorique de la lunette astronomique ou à oculaire convergent ; mais le grand astronome ne réalisa point sa conception, et c'est le P. Scheiner qui fit le premier construire une lunette de ce genre, dont l'usage se substitua peu à peu à celui de la lunette de Galilée. Peu après, Reita inventa la *lunette terrestre* ou *lunette de jour*, qui ne diffère de la lunette astronomique que par la composition de l'oculaire. A l'aide de deux lentilles convergentes de même foyer O′, O″, situées entre le système O′ de l'oculaire astronomique et l'image réelle de l'objectif *ab*, l'image virtuelle *a′ b′* est redressée, comme il est aisé de s'en rendre compte en suivant sur la figure 310 la marche des rayons lumineux. On voit alors que le système oculaire de la lunette terrestre se trouve formé de trois ou quatre lentilles.

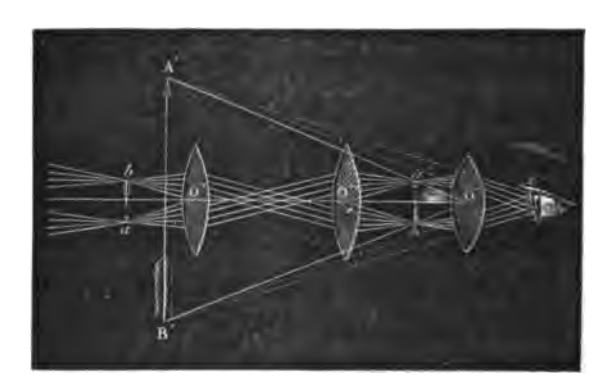


Fig. 310. — Marche des rayons lumineux dans la lunette terrestre.

L'avantage de cette combinaison est le redressement des images qui, pour les objets terrestres, est nécessaire. L'inconvénient est dans l'affaiblissement de l'éclat, qui ne permet plus.

1. On parle en ce moment d'un télescope réfracteur dont la lentille aurait un diamètre de 0m,635 ; cet instrument se construit en Angleterre. M. Alvan Clark, le constructeur de la grande lunette de Cambridge, a entrepris l'exécution d'une lentille de 0m,69. Si le succès couronne cette tentative hardie, c'est encore l'Amérique qui aura, sous ce point de vue, la suprématie.

avec le même objectif, d'employer un grossissement aussi fort. La lumière absorbée par le passage à travers deux nouvelles lentilles est la cause de cet affaiblissement, qui n'existe pas dans la lunette de Galilée.

On construit aujourd'hui des lunettes ou longues-vues de toutes dimensions et de puissance extrêmement variée, aussi bien en vue des applications utiles que pour la distraction et l'agrément. Avant l'invention du télégraphe électrique, les employés des télégraphes aériens se servaient, pour distinguer nettement les signaux, de longues-vues dont les objectifs avaient jusqu'à 8 ou 9 centimètres d'ouverture et $2^m,50$ de distance focale. Les marins emploient des lunettes semblables, de dimensions moindres cependant, parce que le maniement en serait peu commode à bord; les *lunettes de nuit*, dont ils font un fréquent usage, sont, soit des lunettes à oculaire simple comme les lunettes astronomiques, soit des lunettes à objectif de grand diamètre, afin de donner le plus possible de lumière et de permettre l'observation des objets dans l'obscurité.

Pour les maisons de campagne, on construit des lunettes plus puissantes, parce qu'on peut les installer à demeure sur des pieds de formes variées; elles sont munies d'un certain nombre d'oculaires, les uns terrestres, les autres astronomiques, de grossissements différents et qui permettent aux gens du monde, aux amateurs d'astronomie, de faire une série assez nombreuse d'observations intéressantes.

Quant aux instruments d'astronomie proprements dits, ils exigent une perfection qui en rend l'acquisition relativement coûteuse. L'objectif principalement demande, outre la pureté de la matière, un travail de taille et de polissage long et difficile, sans lequel la netteté des images et leur achromatisme ne peuvent être obtenus. Aussi est-il nécessaire de les soumettre à des essais suivis, faits par des yeux exercés et accoutumés aux observations célestes. D'ordinaire on les applique à distinguer certains objets célestes d'une observation difficile, à dédoubler quelques étoiles, à reconnaître les détails de struc-

ture, soit de certaines nébuleuses, soit des anneaux de Saturne, à apercevoir nettement les satellites de cette planète. Au contraire, d'autres objets se voient bien dans presque tous les instruments : telle est la Lune, pour laquelle, comme on l'a dit, il n'est point de mauvaise lunette.

Mais il faut se garder des forts grossissements, sauf pour les étoiles ou les nébuleuses. Un grossissement moyen, qui donne beaucoup de clarté et de netteté, est bien préférable aux amplifications exagérées, qu'on applique trop souvent aux instruments sans utilité réelle.

§ 4. LES TÉLESCOPES CATADIOPTRIQUES.

Un télescope réflecteur ou catadioptrique, ou plus simplement, selon l'usage de notre langue, un télescope, diffère des lunettes ou télescopes réfracteurs en ceci, que l'objectif est un miroir concave au lieu d'une lentille convergente. Ce miroir donne lieu à la formation d'une image réelle de l'objet, image qui est située au foyer principal du miroir quand l'objet est à une distance qu'on peut considérer comme infinie. En disposant convenablement un oculaire pour l'examen de cette image, on obtient l'amplification qu'on désire, comme dans la lunette astronomique.

Cette substitution d'un miroir à la lentille objective avait été imaginée dès 1616 par Zucchi. Mais c'est à l'astronome anglais Gregory que revient le mérite de la première application effective, et l'on peut dire de l'invention du télescope. Comme on va le voir plus loin, l'image de l'objet qu'on grossit à l'aide de l'oculaire, est formée après une double réflexion sur un grand miroir, puis sur un petit miroir, tous deux concaves, d'où résulte une assez grande déperdition de lumière. Newton imagina une disposition différente, dans laquelle la réflexion a lieu aussi sur deux miroirs, et enfin William Herschel a supprimé complètement la seconde réflexion dans les télescopes à

grande ouverture qui portent son nom. Commençons par ce dernier système, le plus simple de tous.

Un miroir concave M disposé au fond du tube de l'instrument reçoit les rayons AB qui émanent de l'objet céleste, et, par la réflexion, donne lieu à la formation d'une image aérienne ou réelle *ba*, renversée. A l'aide de l'oculaire O disposé en avant du foyer principal de l'objectif et sur le bord inférieur du tube du télescope, l'œil voit l'image B'A' agrandie, mais toujours renversée, ce qui est sans inconvénient pour les observations astronomiques.

Cette disposition n'est possible que pour les télescopes dont le miroir a une très grande ouverture. L'image doit se former sur le bord du tube, afin que la tête de l'observateur qui tourne

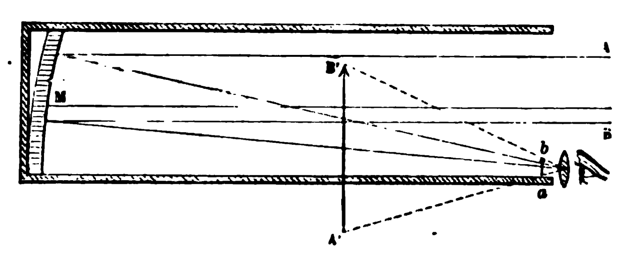


Fig. 311. — Principe et disposition du télescope front-view de W. Herschel.

le dos à la partie du ciel observée, n'intercepte que fort peu de rayons. De là la disposition légèrement inclinée, relativement à l'axe du tuyau, donnée au miroir. Dans un très grand télescope, la portion de la tête qui empiète sur l'ouverture du tube est une petite fraction de la surface du miroir; il n'en serait point ainsi dans un télescope de faibles dimensions.

Les télescopes de ce système sont connus sous le nom de *télescopes front-view*, ou *à vue de face*, que leur avait donné W. Herschel lui-même. Le plus considérable que l'illustre astronome de Slough ait construit sur ce modèle est celui dont la figure 312 donne la vue extérieure. Il n'avait pas moins de 39 pieds 4 pouces anglais de longueur (13 mètres), et le miroir avait un diamètre de 4 pieds 10 pouces (1^{m},47). « De telles dimensions, dit Arago, sont énormes, comparées à celles des

télescopes exécutés jusque-là. Elles paraîtront cependant très mesquines aux personnes qui ont entendu parler d'un prétendu bal donné dans le télescope de Slough. Les propagateurs de ce bruit populaire avaient confondu l'astronome Herschel avec le brasseur Meux, et un cylindre dans lequel l'homme de la plus petite taille pourrait à peine se tenir debout, avec certains tonneaux en bois, grands comme des maisons, où l'on fabrique, où l'on conserve la bière. »

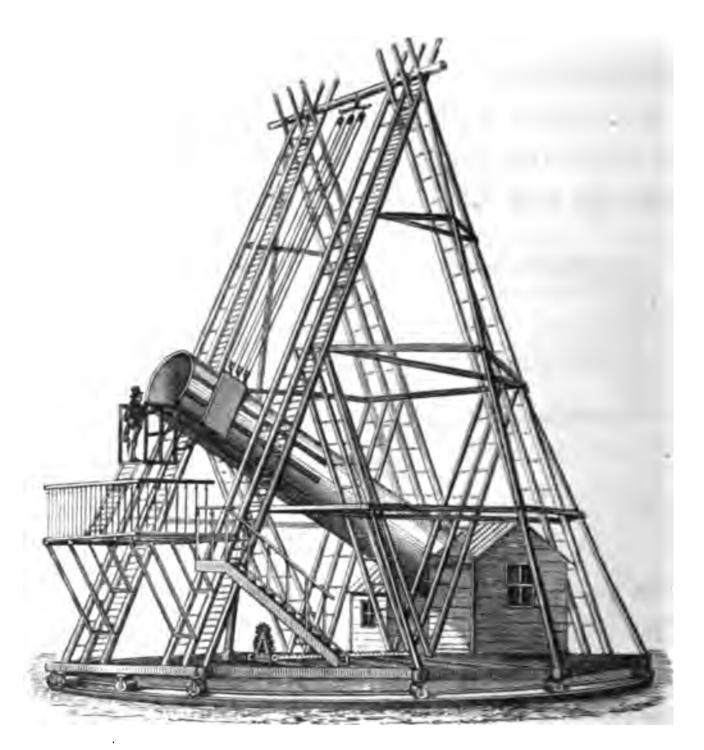
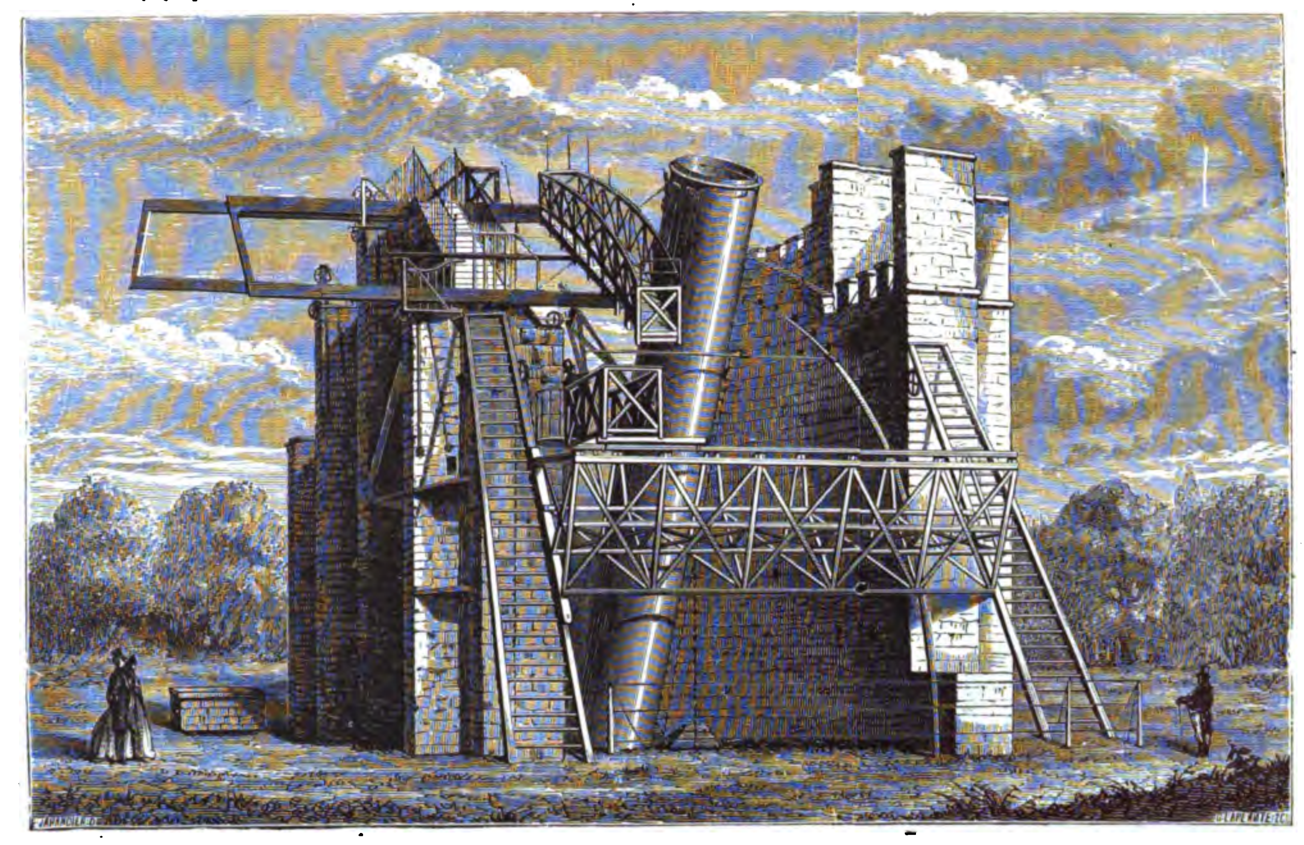


Fig. 312. — Grand télescope front-view de W. Herschel, à l'observatoire de Slough.

Cet immense télescope, qui ne pesait pas moins de 20 quintaux anciens, n'était pas facile à mouvoir. Il fallut une combinaison d'ailleurs fort ingénieuse de mâts, de poulies, de cordages pour la manœuvre, qui exigeait le concours continuel de deux hommes de peine, outre l'aide chargé de prendre l'heure à la pendule. D'ailleurs, l'observation avec d'aussi puissants instruments nécessite un ciel d'une grande pureté, sans quoi le grossissement des irrégularités apparentes provenant des réfrac-



TÉLESCOPE DE LORD ROSSE
à Parsonstown (Irlande).

tions atmosphériques, déforme les images et les rend confuses. « Herschel trouvait qu'en Angleterre il n'y a pas dans l'année plus de cent heures pendant lesquelles on puisse observer fructueusement le ciel avec un télescope de 39 pieds, armé d'un grossissement de 1000 fois. Cette remarque conduisit le célèbre astronome à reconnaître que, pour faire avec son instrument une revue du ciel tellement combinée, que le champ eût été dirigé un seul instant vers chaque point de l'espace, il ne faudrait pas moins de huit cents ans. »

Le télescope que lord Rosse a fait construire et installer dans son parc de Parsonstown, en Irlande, est plus colossal encore que l'instrument déjà énorme d'Herschel. Le miroir métallique, de $1^m,83$ de diamètre, de 17 mètres environ de distance focale, pèse à lui seul près de 4000 kilogrammes. Le poids total de l'appareil optique, tube et miroir, n'est pas moindre de 10 400 kilogrammes. Il supporte des grossissements de 6000 fois. Mais une telle puissance d'amplification n'est applicable qu'à l'observation des objets très lumineux, comme les étoiles ou certaines nébuleuses. La Lune, les planètes, qui n'envoient qu'une lumière réfléchie, ne peuvent être utilement examinées; aussi est-ce aux recherches d'astronomie sidérale que ce magnifique instrument a été appliqué avec le plus de succès. Nous avons donné, dans notre ouvrage LE CIEL, de nombreux échantillons d'images d'amas stellaires et de nébuleuses, observés la plupart à Parsonstown, à l'aide du grand télescope que représente la planche XX.

Arrivons maintenant au télescope de Gregory. Au foyer principal du grand miroir objectif MM placé (fig. 313) au fond du tube de l'instrument, il se forme une image aérienne, réelle et renversée de l'objet céleste AB. En sens inverse du grand miroir et sur le même axe, se trouve disposé un petit miroir concave *mn*. L'image réelle focale du grand miroir est un objet pour ce second miroir; il s'en forme donc une seconde image réelle et renversée en *ab*, de sorte que celle-ci est une image droite de l'objet véritable. Pour donner issue aux faisceaux de lumière

qui la composent, le grand miroir est percé à son centre d'une ouverture, vis-à-vis de laquelle s'adapte le tuyau de l'oculaire.

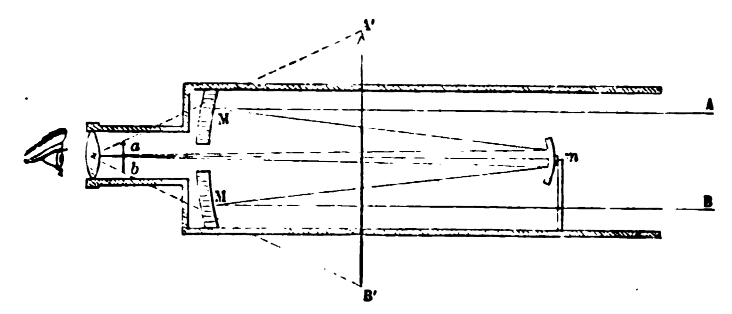


Fig. 313. — Principe et disposition du télescope de Gregory.

Il en résulte que l'observateur a l'œil directement tourné vers la partie du ciel observée, comme dans la lunette astronomique. Il n'intercepte donc pas la lumière qui tombe sur l'objectif. Cette lumière est affaiblie toutefois, d'abord par l'ouverture pratiquée au centre qui en diminue la surface, mais surtout par la seconde réflexion à la surface du petit miroir. C'est là qu'est l'inconvénient des télescopes de Gregory, dont le principal avantage vient de la facilité avec laquelle se font les recherches, sans toutefois que cela dispense de la nécessité d'une petite lunette parallèle ou chercheur.



Fig. 314. — Télescope de Gregory.

Dans les télescopes de Gregory, l'image agrandie A′B′ est droite, ce qui permet d'employer cet instrument comme lunette terrestre. A l'aide d'une tringle extérieure, on peut déplacer

le petit miroir, de manière à mettre au point; pour les myopes, on rapproche le miroir de l'oculaire ou de l'œil; pour les presbytes, on l'éloigne au contraire. La mise au point est aussi nécessaire quand, de l'observation ou d'un objet situé à l'infini, on passe à une observation terrestre d'un objet plus ou moins éloigné, mais à une distance finie de l'observateur.

Le télescope de Cassegrain est à peu près disposé comme celui de Gregory. Il a les mêmes inconvénients et les mêmes avantages, outre qu'il est un peu plus court. Cela tient à ce que le petit miroir, étant convexe, doit être placé en avant de l'image réelle que formerait le grand miroir.

Il nous reste à décrire le télescope imaginé par Newton. Le

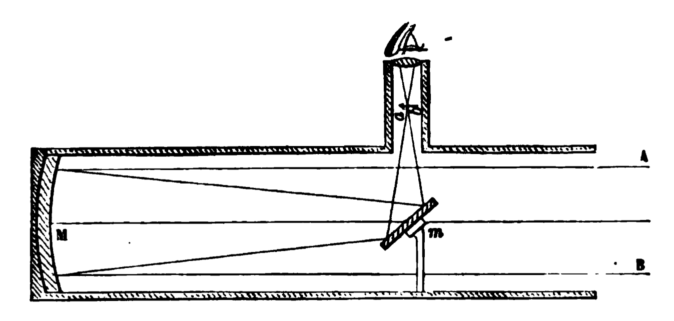


Fig. 315. — Principe et disposition du télescope de Newton.

miroir *m* qui reçoit les faisceaux lumineux émanés de l'objectif M s'y trouve placé, comme dans le télescope de Cassegrain, en avant du foyer principal où viendrait se former l'image réelle de l'objet. Mais c'est un miroir plan incliné à 45 degrés, de sorte qu'il ne fait que renvoyer l'image, égale à la première, dans une direction qui est à angle droit avec celle des rayons de lumière ou avec l'axe de l'instrument. Une ouverture est pratiquée latéralement dans cette direction, et c'est là qu'on place le tuyau de l'oculaire, de manière à examiner l'image agrandie.

Au lieu d'un miroir plan, on met le plus souvent un prisme rectangulaire, et c'est sur la face hypoténuse de ce prisme que viennent tomber les rayons réfléchis par l'objectif. Ils sont eux-

mêmes renvoyés à l'oculaire en vertu du phénomène connu sous le nom de ***réflexion totale***.

W. Herschel a construit, pour ses propres observations, un grand nombre de télescopes ; il en travaillait et polissait lui-même les miroirs, et était devenu très habile dans ces opérations, ordinairement longues et délicates. Voici, à ce sujet, quelques



Fig. 316. — Télescope à miroir argenté de Léon Foucault (système newtonien).

détails intéressants, que nous empruntons à l'excellente notice publiée par François Arago sur les travaux du grand observateur de Slough :

« Avant d'avoir trouvé des moyens directs, certains, de donner aux miroirs la forme de sections coniques, il fallait bien qu'Herschel, comme tous les opticiens ses prédécesseurs, cherchât à atteindre le but en tâtonnant. Seulement ses essais étaient

dirigés de telle sorte qu'il ne pouvait y avoir de pas rétrograde. Dans son mode de travail, le mieux, quoi qu'en dise un ancien adage, n'était jamais l'ennemi du bien. Quand Herschel entreprenait la construction d'un télescope, il fondait[1] et façonnait plusieurs miroirs à la fois : dix, par exemple. Celui de ces miroirs auquel des observations célestes faites dans des circonstances favorables assignaient le premier rang, était mis de côté, et l'on retravaillait les neuf autres. Lorsqu'un de ceux-ci devenait fortuitement supérieur au miroir réservé, il en prenait la place, jusqu'au moment où, à son tour, un autre le primait, et ainsi de suite. Est-on curieux de savoir sur quelle large échelle marchaient ces opérations, même à l'époque où, dans la ville de Bath, Herschel n'était qu'un simple amateur d'astronomie? Il fit jusqu'à deux cents miroirs newtoniens de 7 pieds anglais (2^m,13) de foyer; jusqu'à cent cinquante miroirs de 10 pieds (3^m,05), et environ quatre-vingts miroirs de 20 pieds (6^m,096).

« Chaque fois qu'Herschel entreprend de polir un miroir de télescope, dit Lalande, il en a pour dix, douze, quatorze heures d'un travail continu. Il ne quitte pas un instant, même pour manger, et reçoit de la main de sa sœur les aliments sans lesquels on ne pourrait supporter une si longue fatigue : pour rien au monde Herschel n'abandonnerait son travail; suivant lui, ce serait le gâter. »

Les télescopes à miroirs métalliques offrent de graves inconvénients : outre le poids énorme de l'objectif, dès que l'ouverture atteint des dimensions un peu considérables, ils ont le défaut d'exiger assez fréquemment le polissage des réflecteurs, qui se ternissent sous l'influence de l'humidité atmosphérique. Le polissage est lui-même une opération délicate, puisqu'elle peut altérer la courbure du miroir.

1. Le métal avec lequel on fabrique les miroirs de télescope est du bronze composé de 67 de cuivre et de 33 d'étain. On y ajoute quelquefois de faibles proportions de laiton, d'argent, d'arsenic et aussi de platine. Cet alliage a une nuance jaunâtre et est susceptible d'acquérir un très beau poli.

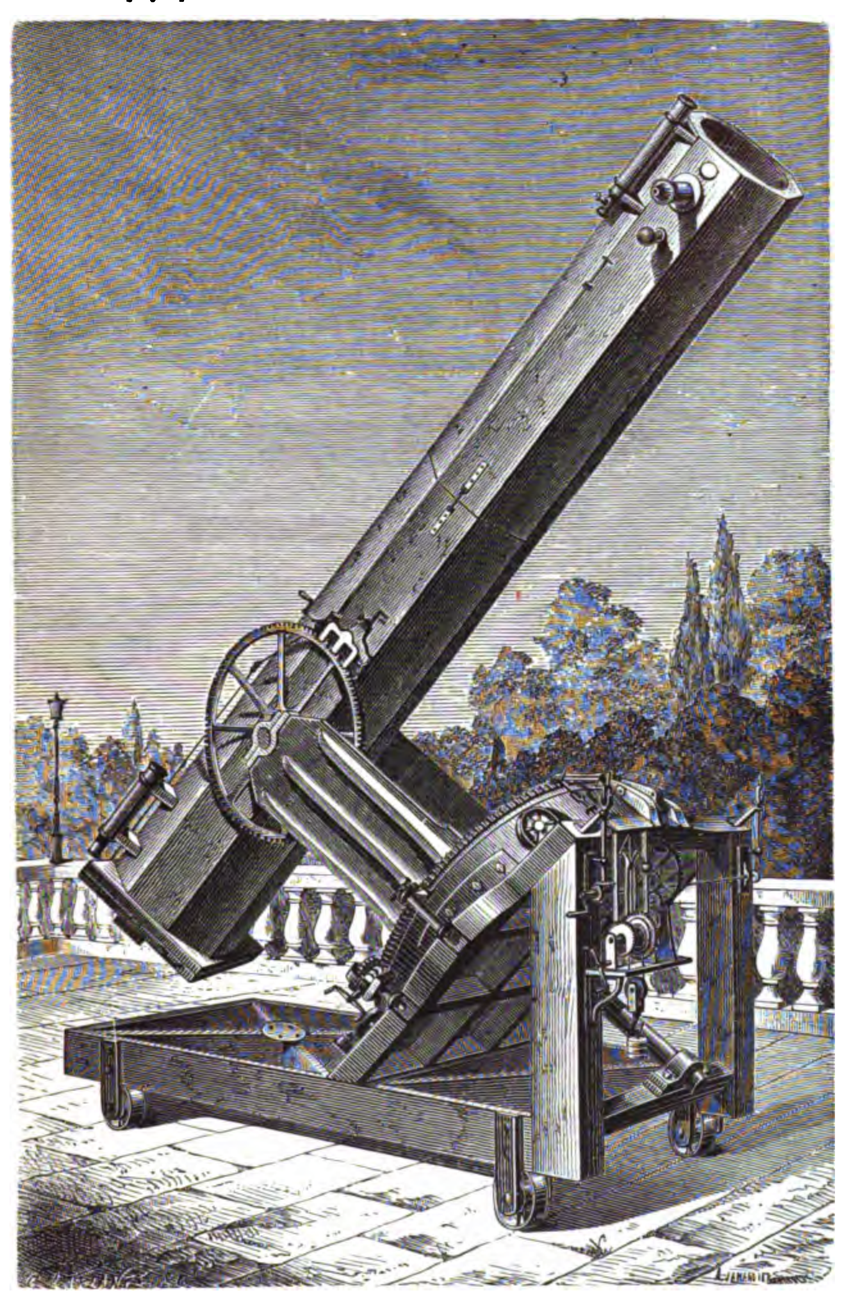
Léon Foucault est arrivé à conserver au télescope son principal avantage sur les lunettes astronomiques, qui est l'absence d'aberration de réfrangibilité, tout en diminuant considérablement, à ouverture égale, le poids de l'objectif, et en rendant la courbure du miroir à peu près inaltérable. Pour cela, il a substitué des miroirs de verre aux miroirs métalliques, et il les a rendus exempts d'aberration de sphéricité, en les travaillant par une méthode spéciale, jusqu'à ce qu'ils eussent une forme parabolique à peu près parfaite.

D'autre part, il a augmenté le pouvoir réfléchissant du miroir en argentant la surface. A l'aide d'une dissolution de nitrate d'argent ammoniacal dans l'alcool, on peut, à la température ordinaire, recouvrir cette surface d'une double pellicule métallique, qu'on renouvelle aisément quand elle s'altère par l'usage, sans nuire en rien à la forme géométrique du miroir[1].

Un instrument de ce genre, disposé d'après le système newtonien, et monté parallactiquement de manière à pouvoir suivre le mouvement d'un astre, d'une planète, d'une nébuleuse, à mesure que l'entraîne le mouvement diurne, a été construit par l'habile physicien en 1862, et envoyé à l'observatoire de Marseille, où il a rendu à l'astronomie physique des services signalés (voir la planche XXI). L'objectif n'a pas moins de 80 centimètres d'ouverture (78 de diamètre utile) et 4^{m},50 de longueur focale principale. L'oculaire n'est autre chose qu'un microscope, composé de façon que l'image soit totalement exempte d'aberration.

On construit des télescopes à miroir argenté de petites dimensions qui supportent des grossissements de 60 à 200 fois. Tel

1. Il n'en est pas de même pour le polissage des miroirs métalliques. Lorsque le travail si long et si délicat, qui consiste à obtenir la courbure convenable, est terminé pour une surface métallique, ce résultat est malheureusement précaire, comme Léon Foucault le faisait avec raison remarquer, et il se trouve en effet compromis dès l'instant où le poli vient à s'altérer sous l'influence des agents atmosphériques. « Sur le verre, au contraire, dit-il, la courbure, une fois réalisée, peut être considérée comme acquise d'une manière définitive, attendu que les altérations qui surviennent avec le temps n'intéressent que la couche métallique déposée après coup par une opération que rien n'empêche de renouveler indéfiniment. »



TÉLESCOPE A MIROIR ARGENTÉ DE L. FOUCAULT.
Système newtonien.

est celui dont la figure 316 représente le modèle et dont le miroir a 10 centimètres de diamètre et 60 centimètres seulement de distance focale. Avec un semblable instrument, les amateurs d'astronomie peuvent dédoubler nombre d'étoiles, observer les satellites de Jupiter, l'anneau de Saturne, les taches du Soleil et reconnaître des détails fort intéressants dans les montagnes lunaires.

§ 5. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS RESPECTIFS DES LUNETTES ET DES TÉLESCOPES.

Les télescopes que nous venons de décrire appartiennent à deux genres principaux : les réfracteurs, les réflecteurs. Dans chacun d'eux, le système ou appareil oculaire est le même; c'est par l'appareil objectif qu'ils diffèrent essentiellement. Les uns et les autres sont en usage dans tous les observatoires des deux mondes, et l'on a maintes fois discuté leur valeur respective. La vérité est qu'il est difficile de se prononcer d'une manière absolue. Tel système l'emporte dans un cas, et se trouve inférieur dans un autre; les avantages et les inconvénients se compensent plus ou moins, selon l'instrument, l'habileté de son constructeur, celle de l'observateur qui l'emploie et aussi selon l'usage spécial auquel il est destiné.

Les avantages propres aux réfracteurs ou lunettes astronomiques sont les suivants : ce sont des instruments d'un maniement plus commode; leurs objectifs sont plus durables et ne s'altèrent qu'à la longue. Enfin, à ouverture égale, ils donnent une plus grande clarté que les miroirs. Les instruments méridiens et le plus grand nombre des équatoriaux sont des télescopes réfracteurs. En revanche, ils sont plus difficiles à établir, et par conséquent plus coûteux. La difficulté que l'on a d'obtenir des masses de verre d'assez grandes dimensions, sans défauts, sans stries, a empêché longtemps que l'on construisît des lunettes d'une très grande ouverture. Quand une masse de dimensions convenables est coulée, le travail de taille ou de

polissage est considérable, puisque, pour chaque objectif achromatique, il faut travailler quatre surfaces différentes, tandis que l'objectif d'un réflecteur ne possède qu'une surface unique.

Là est le principal avantage du télescope réflecteur. Le miroir qui en constitue l'objectif n'a pas d'aberration de réfrangibilité : il est nécéssairement achromatique et l'aberration de sphéricité est la seule qu'il y ait lieu de corriger. Mais l'absorption de lumière est considérable ; le poids de la masse métallique rend la manœuvre de l'instrument difficile, incommode, quand l'ouverture atteint de grandes proportions ; sous l'influence des agents atmosphériques, la surface du miroir se détériore promptement, et enfin, quand il y a lieu de reprendre l'opération du polissage, la surface elle-même, au point de vue géométrique, est altérée, ce qui exige de nouvelles retouches.

On a vu toutefois que l'innovation introduite par Léon Foucault remédie à une partie de ces inconvénients, et notamment au dernier, puisque la surface du verre ne subit aucun changement lorsque la couche d'argent doit être renouvelée.

Cependant les lunettes ont encore sur les réfracteurs cet avantage que la colonne d'air enfermée dans le tube entre l'objectif et l'oculaire reste à l'abri des perturbations qui proviennent des inégalités de température. Dans un télescope réflecteur, au contraire, cette colonne est en communication avec l'extérieur, ce qui est un grave inconvénient. Deux de nos compatriotes, MM. Paul et Prosper Henry, ont imaginé une disposition qui le supprime et qui, sous ce rapport, met leur télescope au niveau des lunettes. Voici comment ils rendent eux-mêmes compte des raisons qui les ont amenés à construire un nouveau télescope catadioptrique.

« La question relative à la supériorité des lunettes sur les télescopes, disent-ils, est souvent revenue en discussion et n'a pas été jusqu'à présent résolue.

« Théoriquement, en raison de leur achromatisme parfait, les télescopes à réflexion sembleraient devoir l'emporter en définition et en netteté sur les lunettes, avec lesquelles il paraît

impossible, dans l'état actuel de la science, de supprimer l'aberration secondaire de réfrangibilité.

« En pratique cependant il en est tout autrement : au point de vue de la puissance optique, les lunettes se sont toujours montrées supérieures aux réflecteurs. Cette anomalie, attribuée à des causes diverses, a vivement frappé tous les astronomes et a toujours été pour eux un sujet de préoccupation.

« Nous avons fait un grand nombre d'expériences dans le but de reconnaître à quoi tenait cette infériorité des télescopes. Il résulte de nos recherches que le manque de netteté, ou plutôt l'instabilité des images produites par ces sortes d'instruments, tient presque uniquement à ce que des masses d'air de densités inégales, provenant du dehors, s'introduisent dans l'intérieur du tube, où elles séjournent en tourbillonnant. En traversant ce milieu hétérogène, les rayons incidents et les rayons réfléchis sont fortement troublés, et il n'arrive à l'œil de l'observateur qu'une image confuse.

« Cette cause de trouble a déjà été soupçonnée, et différents moyens ont été proposés pour y remédier. Ainsi, par exemple, on a pensé qu'en pratiquant des ouvertures vers la partie inférieure du tube du télescope, il se produirait un équilibre de température plus complet entre l'air renfermé dans ce tube et l'air extérieur. En fait, dans de telles conditions, les images se sont toujours montrées plus confuses qu'auparavant.

« Un autre procédé, préférable selon nous, a été appliqué à différents instruments, notamment au télescope de M. Lassell et à celui de Melbourne : il consiste à supprimer pour ainsi dire le tube, en ne laissant de ce dernier que ce qui est absolument nécessaire pour relier d'une façon rigide le miroir objectif à l'oculaire. Cette disposition, néanmoins, n'est efficace qu'avec des temps très calmes ; par le vent le plus faible, les images paraissent agitées.

« Les télescopes ont un autre défaut grave, qui les rend assez incommodes et en restreint notablement l'emploi. Ce défaut provient de ce que la surface réfléchissante des miroirs sous

l'influence du contact de l'air, de l'humidité, des poussières, etc., se ternit rapidement. Il résulte de ces différentes causes d'altération une perte sensible de lumière, qui oblige à renouveler fréquemment le poli de la surface.

« Pour remédier à ces divers inconvénients, on est amené naturellement à placer le télescope dans les mêmes conditions que la lunette, c'est-à-dire à fermer hermétiquement son tube par une lentille de verre taillée de telle sorte qu'elle ne nuise en rien au pouvoir optique de l'instrument.

« Nous avons réalisé cette expérience de la façon suivante.

« A l'ouverture d'un télescope newtonien à miroir de verre argenté, de $0^m,10$ de diamètre et de $0^m,60$ de longueur focale, nous avons placé une lentille de crown-glass de même grandeur que le miroir et très légèrement concave. Cette forme réunit plusieurs avantages : elle évite la double image, très faible à la vérité, qui résulterait de l'interposition d'un verre plan; de plus, elle détruit l'aberration de réfrangibilité du microscope oculaire, qui, dans notre instrument, n'est formé que de verres simples. Nous nous sommes assurés, par expérience, que cette modification apportée au télescope est absolument sans inconvénient. La perte de lumière qui résulte de l'addition de la lentille, qui peut être très mince, est tout à fait négligeable, et, comme cette dernière, ainsi que nous l'avons dit, est presque plane, elle n'exige pas un centrage rigoureux. Cette lentille et le miroir ont d'ailleurs été retou-

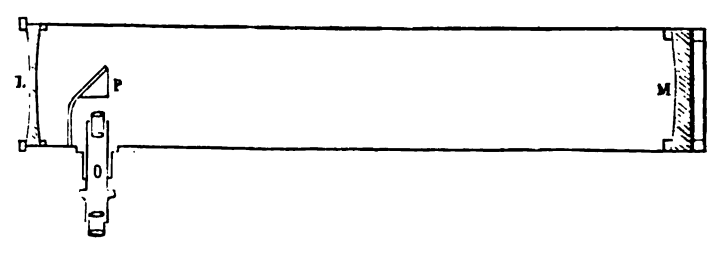
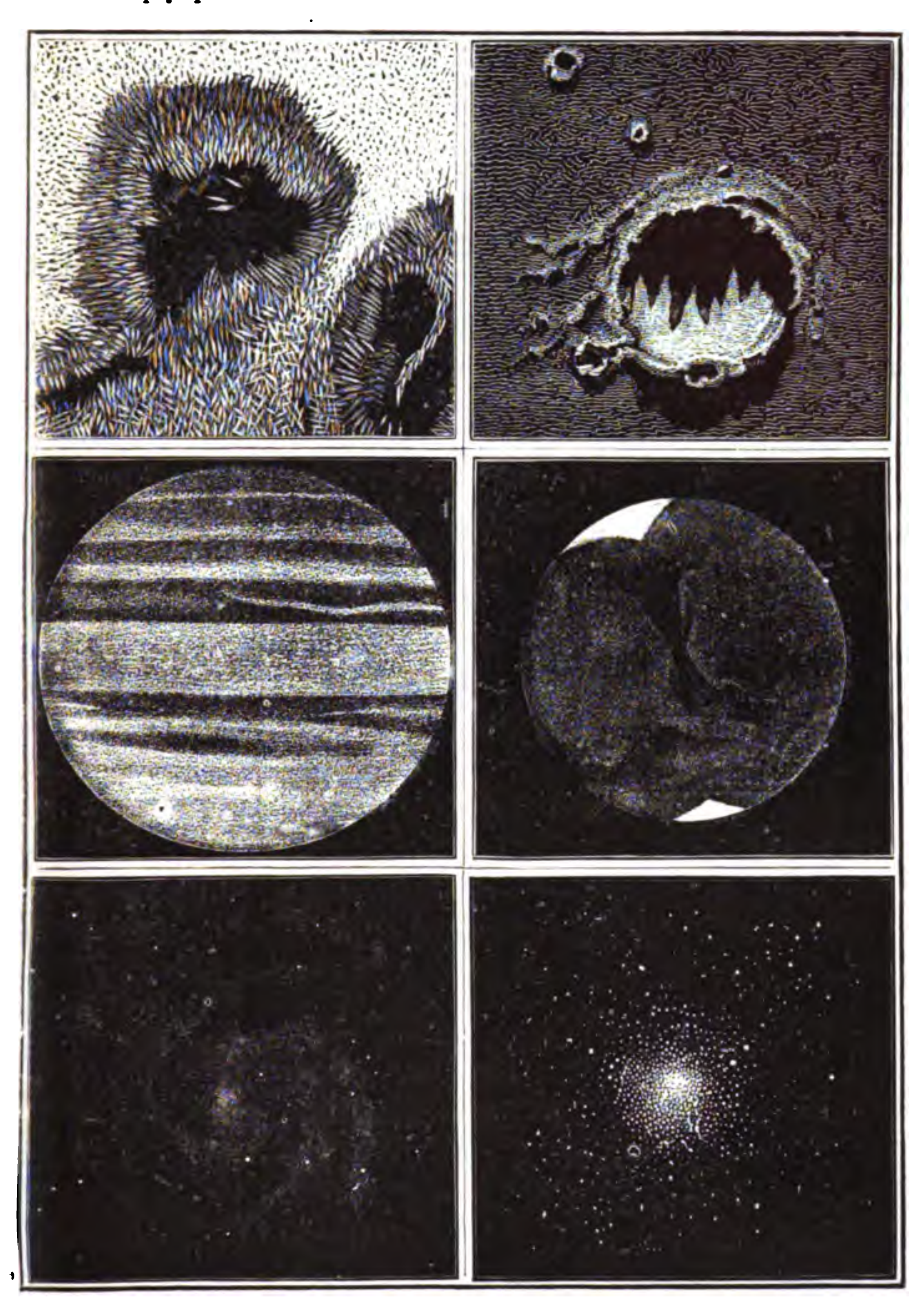


Fig. 317. — Nouveau télescope catadioptrique de MM. Paul et Prosper Henry : M, miroir parabolique en verre argenté; P, prisme à réflexion totale destiné à renvoyer dans le microscope oculaire l'image produite par le miroir; O, microscope oculaire composé de 4 lentilles simples; L, lentille biconcave de crown-glass fermant l'ouverture du télescope.



LE TÉLESCOPE APPLIQUÉ A L'ÉTUDE DU CIEL.

1. Taches solaires. — 2. Cratères lunaires. — 3. La planète Jupiter avec ses bandes. — 4. Taches de Mars, ses pôles, ses continents et ses mers. — 5. Une nébuleuse spirale. — 6. Un amas stellaire.

chés par les procédés de L. Foucault, de façon à constituer un système optique complètement exempt d'aberration de sphéricité. »

« Dirigé sur le ciel, cet instrument a donné des résultats remarquables. On a pu, à son aide, dédoubler constamment l'étoile σ^2 du Cancer, dont les deux composantes ne sont distantes que de 1",5; le Compagnon de Rigel était facilement visible, et l'image d'une étoile brillante s'est toujours montrée plus calme dans ce télescope que dans un autre de même ouverture, mais monté à la façon ordinaire. »

Si l'on voulait se faire une juste idée des importants services que l'invention des télescopes a rendus depuis deux siècles aux sciences d'observation et notamment à l'astronomie, c'est l'histoire même de ces sciences qu'il faudrait lire : à chaque page, on s'arrêterait émerveillé devant la grandeur des résultats. Mais ce ne sont pas seulement les curiosités, les merveilles du ciel qu'il faudrait passer en revue, ce n'est pas seulement la profondeur des espaces infinis où brillent les systèmes d'étoiles et les nébuleuses qu'il faudrait explorer. Il faudrait encore et surtout insister sur les progrès que l'usage de ces instruments a fait faire à l'astronomie de précision, et par là aux théories sublimes qui expliquent aujourd'hui toutes les lois des mouvements célestes, en considérant l'univers entier comme un système de corps réagissant les uns sur les autres, système offrant aux géomètres, sur une échelle infinie, comme l'application la plus admirable des théorèmes de la mécanique rationnelle.

Le public, qui ne connaît généralement que par ouï-dire les travaux des observatoires, ne peut évidemment se rendre compte de leur importance relative, et il est toujours tenté de placer au premier rang les observations propres à piquer sa curiosité. Mettre l'œil à l'oculaire d'un télescope d'une grande puissance, contempler de visu les phénomènes dont il a lu dans les livres la description, ou dont il a admiré des reproductions plus ou moins fidèles, là surtout est pour lui la chose

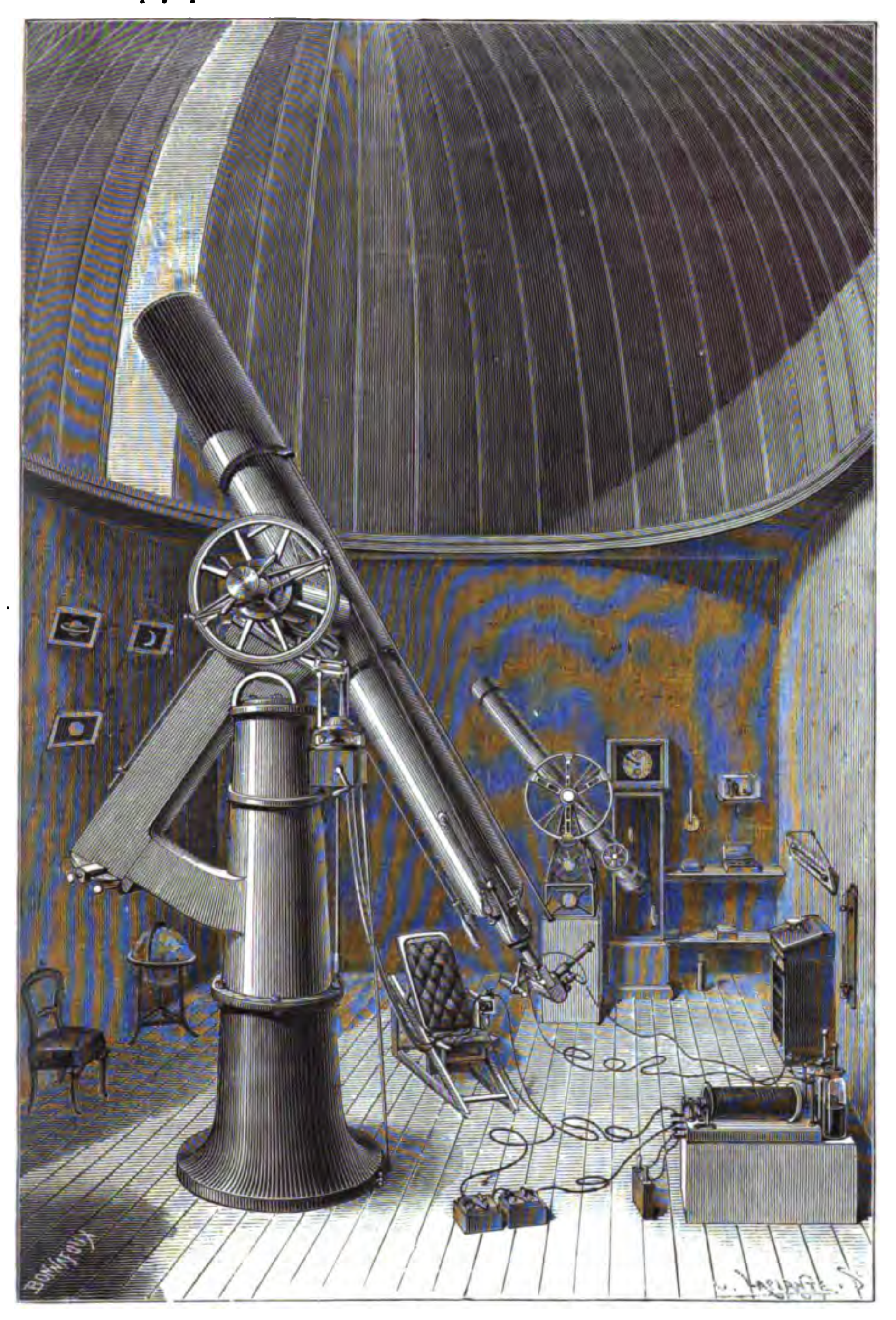
par excellence, le rêve de l'astronome amateur ou improvisé.

La vérité est que l'application des instruments d'optique à l'étude des phénomènes d'astronomie physique, quelque importance qu'elle ait eue dans le passé et qu'elle doive avoir encore dans l'avenir, n'est pas à comparer aux services que ces mêmes instruments ont rendus à l'astronomie de précision. La détermination des positions des étoiles fondamentales, que les grands instruments méridiens ont permis d'atteindre avec une perfection croissante, les observations des planètes, de la Lune et du Soleil, ont fourni à la théorie du système du monde des données de plus en plus certaines, ont permis de calculer des tables des positions futures des astres, en tenant compte des influences réciproques que leurs masses exercent les unes sur les autres. Ces travaux de longue haleine, ces observations délicates, les calculs laborieux qui en sont la suite, voilà surtout la besogne sérieuse, capitale, des grands observatoires, et ils eussent été impossibles sans le concours simultané des perfectionnements apportés aux méthodes d'observation, aux instruments qui servent à mesurer le temps, à ceux qui, ayant pour objet la détermination des angles, sont basés sur les lois rigoureuses de l'optique.

Les théories de la mécanique céleste, incessamment développées et approfondies, sont le résultat magnifique de cette application de l'optique à l'astronomie[1].

Cependant les conquêtes que les lunettes et les télescopes ont faites dans un autre ordre de recherches, pour avoir une moindre importance au point de vue de la science pure, n'en sont pas moins brillantes ni moins fécondes. Les premières applications des lunettes, d'une bien modeste puissance au début, ont agrandi subitement le domaine du ciel, restreint jus-

1. Indépendamment de leur application aux études astronomiques, les lunettes sont d'un usage précieux pour des travaux qui exigent une mesure précise des angles, comme ceux de la géodésie. A proprement parler, les méthodes sont les mêmes dans l'une et l'autre science et les instruments communs. C'est ainsi que les géodésistes emploient la lunette méridienne comme les astronomes; la construction en est seulement modifiée de façon à rendre l'instru-



TÉLESCOPE DE TULSE HILL

Installé par W. Huggins pour ses études de spectroscopie.

qu'alors aux objets visibles à l'œil nu. Quand Galilée, il y a bientôt trois siècles, tourna vers le ciel étoilé la lunette qu'il venait de construire, il fut frappé de l'accroissement considérable du nombre des étoiles, surtout dans le voisinage de la Voie Lactée, dont la véritable composition fut ainsi révélée. Les

ment portatif. Le *théodolite*, que représente la figure 318, sert à mesurer la hauteur angulaire d'un point ou d'un astre au-dessus de l'horizon, et en même temps à déterminer son

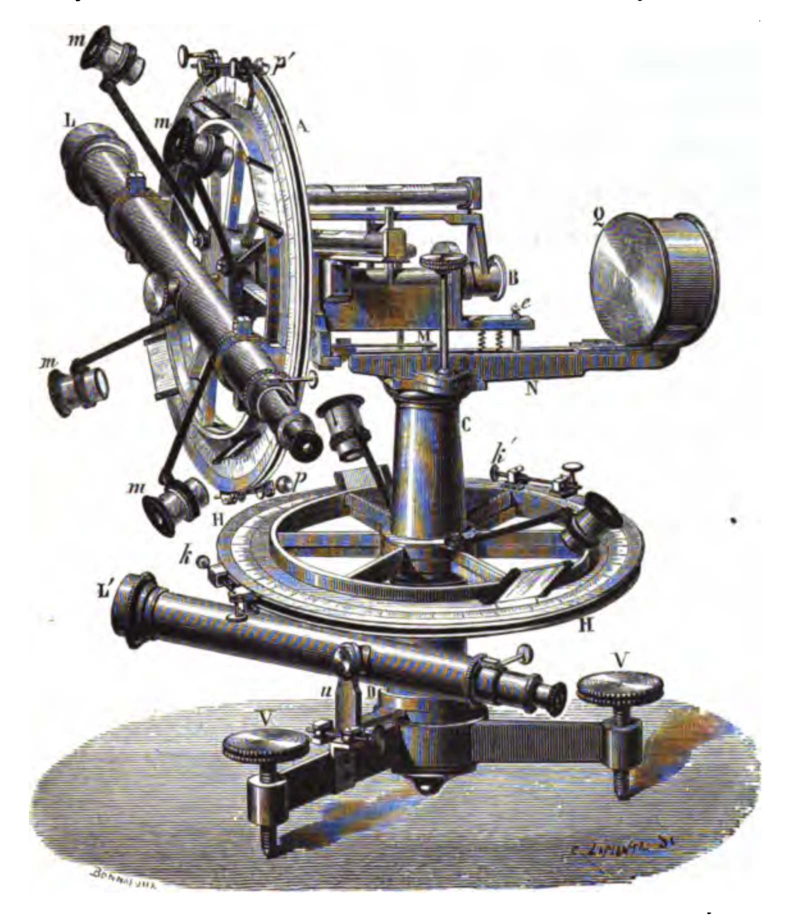


Fig. 318. — Théodolite de Gambey : A, cercle vertical divisé, mobile autour de l'axe horizontal B; L, lunette ou alidade concentrique, servant à viser l'étoile dont on cherche la distance zénithale : cette distance se lit sur le cercle vertical; H, cercle horizontal ou azimutal divisé, sur lequel se lit l'angle dont le cercle vertical a tourné autour de l'axe C, quand on a visé successivement deux étoiles différentes; L', lunette servant à viser un point éloigné servant de repère.

azimut, c'est-à-dire l'angle que forme le plan vertical où ce point se trouve au moment de l'observation, avec un plan qui sert d'origine et qui est soit le plan méridien, soit plutôt un plan perpendiculaire au méridien, le *premier vertical*. La légende de la figure suffira à faire comprendre comment on atteint l'un et l'autre de ces buts à l'aide du théodolite.

taches du Soleil, les satellites de Jupiter, les phases de Vénus furent autant de phénomènes nouveaux livrés à l'étude des astronomes. Les découvertes succédèrent aux découvertes à mesure que les opticiens réussirent à accroître la puissance de pénétration des instruments. Puis de nouvelles méthodes d'investigation furent inventées. Nous avons dit déjà quels résultats ont été obtenus par l'application de l'analyse spectrale à la lumière des corps célestes. Il faut y joindre ceux qu'a donnés la photographie, dont nous parlerons dans les chapitres qui vont suivre. Ces deux branches de l'Optique appliquée à l'Astronomie ont pris dès maintenant un tel développement, que des astronomes y consacrent presque exclusivement leur temps et les ressources de leurs observatoires.

CHAPITRE V

LE STÉRÉOSCOPE

§ 1. LA VISION EN RELIEF. — LE STÉRÉOSCOPE DE RÉFLEXION DE WHEATSTONE.

Quand nous examinons, sans autre secours que celui de nos yeux, un paysage, un arbre, un monument, nous n'avons pas seulement la sensation d'un tableau, c'est-à-dire d'une représentation plane des objets qui viennent se peindre chacun sur notre rétine. Nous avons en outre l'impression, très nette et très vive, du relief des objets, de leurs distances inégales, des intervalles qui les séparent : la profondeur de l'espace est une sensation intuitive résultant tout simplement du phénomène normal de la vision.

Pourquoi les tableaux peints, quel que soit le mérite de l'artiste auquel ils sont dus, quelle que soit la fidélité de la perspective, des contours des objets, du coloris et de ses nuances, ne produisent-ils pas une sensation pareille? C'est un grand et rare talent que celui de mettre de l'air dans un tableau, de la profondeur dans un paysage; mais alors même que le peintre y a réussi, l'illusion du relief est loin d'égaler la nature.

Longtemps on ne s'est point rendu compte de cette différence entre la représentation plane et la vue réelle, la vision en relief. Il y a cependant un moyen très simple d'en trouver la raison. Qu'après avoir observé un objet réel avec les deux yeux, on vienne à l'examiner à l'aide d'un seul œil, celui de droite ou celui de gauche : à l'instant le relief, la sensation de la profon-

deur disparaît; du moins celle-ci est-elle en grande partie atténuée. Le paysage réel semble alors une peinture dont les divers plans se confondent. Toutefois cette différence entre la vision ordinaire ou binoculaire et la vision monoculaire est à peu près insensible pour les objets éloignés; elle est au contraire d'autant plus forte, que les objets sont plus rapprochés; elle est maximum pour ceux qui sont au premier plan.

Ce premier point constaté, comment les choses se passent-elles quand on examine un objet en relief avec un œil seul? C'est ce que tout le monde peut vérifier de la manière la plus

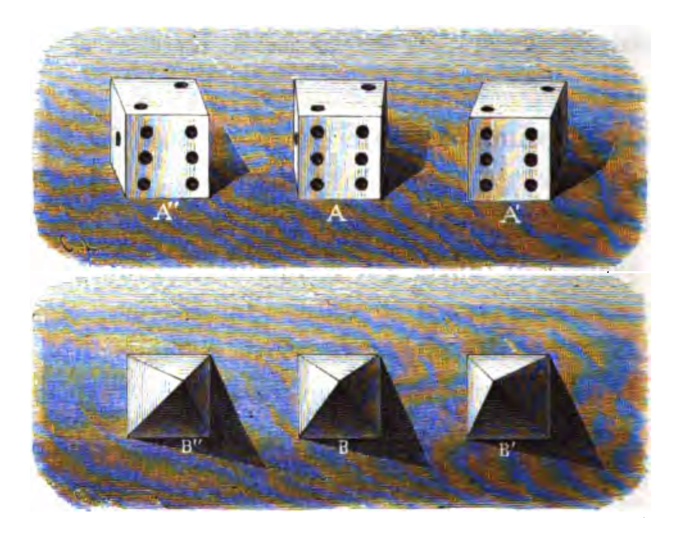


Fig. 319. — Différence entre la vision monoculaire et la vision binoculaire.

simple. Prenons pour exemple un cube, ce dé à jouer ou cette pyramide quadrangulaire (fig. 319).

Plaçons-les l'un et l'autre dans le plan qui passe par la ligne médiane des deux yeux, et regardons-les chacun avec les deux yeux : les deux figures A et B représenteront les deux objets vus de cette façon. Fermons l'œil gauche, l'aspect changera. Du dé A′, la face latérale de droite paraîtra plus grande, tandis que celle de gauche aura disparu; les faces latérales de la pyramide B′ seront d'inégale grandeur apparente, la plus grande étant à droite. Fermons au contraire l'œil droit, l'inverse aura lieu, comme le montrent les images A″ et B″.

On peut faire mille expériences semblables sur les objets plus ou moins éloignés qu'on a devant soi. On reconnaîtra que la vue, avec l'œil droit seul, découvre des parties qui restent cachées quand on examine avec l'œil gauche unique. Il faut conclure de là qu'une image différente du même sujet se peint sur chaque rétine, droite ou gauche, de sorte qu'il paraîtrait devoir en résulter, pour la vision binoculaire, une double image. Or l'expérience prouve qu'il n'en est pas ainsi, que ces deux images se superposent et ne donnent qu'une sensation simple, où les parties différentes des images composantes se trouvent réunies. La vue complète ou normale enveloppe pour ainsi dire les objets en relief, et cela d'autant plus qu'ils sont plus rapprochés.

Qu'on joigne à cela la nécessité de l'accommodation de l'œil pour la vision nette suivant les circonstances, et l'on comprendra la différence que nous avons plus haut constatée entre la sensation que produit la vue binoculaire des objets réels et la sensation donnée par le tableau le mieux rendu qui représente les mêmes objets. Dans ce dernier cas, c'est toujours la même image qui est peinte sur les deux rétines et la vision en relief, la *vision stéréoscopique* (des deux mots grecs στερεός, *solide*, et σκοπεῖν, *voir*), est impossible.

C'est à l'analyse de ces phénomènes qu'est due l'invention des instruments d'optique auxquels on donne le nom de *stéréoscopes*. Un célèbre physicien anglais, M. Wheatstone, est le premier qui ait eu cette idée et qui l'ait réalisée dans le petit appareil qui porte le nom de *stéréoscope de réflexion*.

En voici la disposition très simple. M et M′ (fig. 320) sont deux miroirs disposés verticalement à angle droit sur une planchette rectangulaire, de manière à former avec les bords de cette planchette des angles de 45°. Deux montants latéraux A et A′ sont munis de glissières et peuvent recevoir ainsi deux images du même objet, de la même vue, de la même scène ou tableau. Il est évident que ces images vont se reproduire dans chacun des miroirs et former deux images virtuelles, en appa-

rence placées derrière chaque miroir symétriquement par rapport à l'objet lui-même. Ainsi ab donnera lieu à l'image a_1b_1; les deux mêmes points $a'b'$ de l'objet de droite formeront une image $a'_1b'_1$, qui se superposera exactement sur la première.

Si donc les deux yeux OO′ sont placés vis-à-vis chaque miroir, et si un diaphragme empêche chacun d'eux de voir l'image produite sur le miroir d'à côté, les deux images a_1b_1 et $a'_1b'_1$ sembleront partir des mêmes points de l'espace; elles se peindront sur les rétines de chaque œil comme le ferait la vue d'un objet réel. Maintenant, que faut-il pour qu'il y ait identité complète entre les phénomènes de vision dans le cas de l'objet réel ou en relief, et du même objet simple tableau? C'est que les deux vues séparées soient précisément celles que percevrait

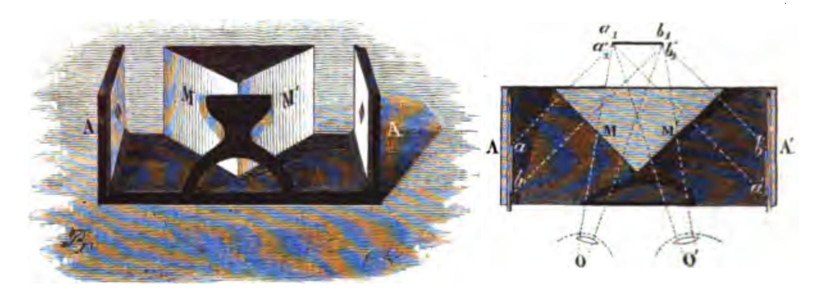


Fig. 320. — Stéréoscope de réflexion de Wheatstone.

chacun des deux yeux, s'il examinait chacune d'elles du point de vue où s'est placé l'artiste.

C'est là une condition essentielle de la vision stéréoscopique; si elle est réalisée, la superposition des images se fera comme dans la nature même. On aura devant soi, non plus seulement une représentation plane, mais une vision en relief, d'autant plus saisissante et plus vive que les tableaux seront reproduits avec une fidélité plus grande, avec les détails des ombres et de leurs nuances. Si les couleurs n'y sont point, on croira voir des objets en marbre, une véritable reproduction sculpturale de la nature[1].

1. « Les effets du stéréoscope se manifestent de la manière la plus saisissante à l'inspection de dessins qui ne représentent que des contours de corps et des surfaces et où toutes les circonstances favorables accessoires de couleur, d'ombre, etc., font complètement défaut :

Le *stéréoscope de réflexion* de Wheatstone n'a pas tardé à être modifié, ou du moins le principe de son exécution a été l'objet d'un instrument plus commode, plus parfait, dont l'invention est due à un de ses compatriotes, M. Brewster, et qui a été perfectionné lui-même par deux de nos opticiens les plus distingués, MM. Soleil et Duboscq.

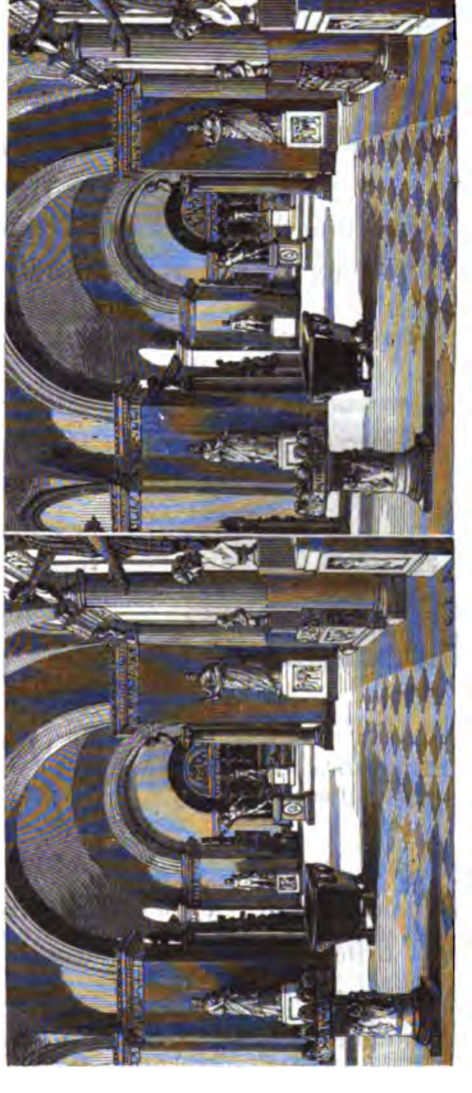


Fig. 321. — Épreuves stéréoscopiques. Fac-simile d'une photographie représentant une salle du musée du Louvre.

Mais avant de décrire le stéréoscope de réfraction disons un mot d'un procédé très simple qui permet de réaliser la vision stéréoscopique des images. Il suffit, pour cela, de placer les deux dessins convenablement reproduits à côté l'un de l'autre, comme on le voit dans la figure 321, et d'interposer un diaphragme, un morceau de papier ou de carton sur la ligne médiane, entre les deux yeux. Au bout de quelques secondes, les deux images se superposent et le relief apparaît. Toutefois, c'est un exercice fatigant pour la vue,

les lignes noires n'en paraissent pas moins se détacher complètement du papier et se localiser dans l'espace. Les dessins de stéréotomie les plus compliqués, ceux qui représentent des cristaux et qui offrent à l'œil nu une confusion de lignes presque inextricable, se résolvent comme par enchantement pour donner l'apparence du relief. » (Helmholtz, *Optique physio logique*.)

et les stéréoscopes, comme on sait aujourd'hui les construire, ont un avantage marqué sur ce procédé élémentaire de stéréoscopie.

§ 2. STÉRÉOSCOPE DE RÉFRACTION DE BREWSTER. — STÉRÉOSCOPE D'HELMHOLTZ. PSEUDOSCOPE.

Arrivons au *stéréoscope de Brewster*.

Ce n'est plus par la réflexion à la surface de deux miroirs qu'on examine les deux images, mais directement, en plaçant les deux yeux au devant de deux verres, formés des deux portions A, A′ d'un prisme ou d'une lentille convergente.

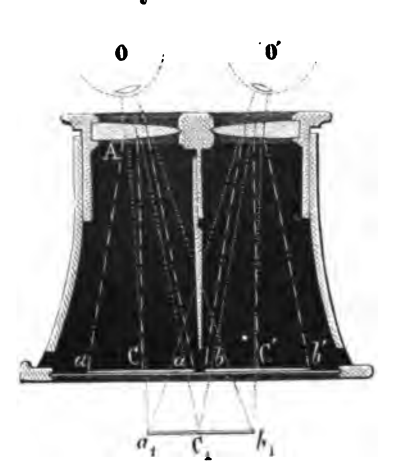


Fig. 322. — Stéréoscope de réfraction. Coupe.

Considérons un même point CC′ du dessin représenté dans chaque vue stéréoscopique ; chacun de ces points envoie un faisceau de lumière qui se réfracte dans l'un et l'autre prisme. Il en résulte deux images qui toutes deux se forment au même point, au delà du plan du dessin, en C_1. Il en est de même pour toutes les parties correspondantes du tableau, de sorte que, les deux vues stéréoscopiques se trouvant peintes simultanément en $a_1 b_1$, celle de droite impressionne la rétine droite, celle de gauche la rétine gauche. La vision en relief en résulte avec une grande perfection si les images sont des reproductions photographiques exactes, si surtout elles ont été rigoureusement prises des points de vue convenables et avec des conditions de lumière favorables.

Il importe d'éclairer également les deux images, ce qu'on obtient en portant le stéréoscope aux yeux dans une direction normale à celle du jour, de façon que la lumière entre aussi vive de chaque côté du diaphragme par l'ouverture ménagée à

cet effet. S'il s'agit de vues photographiques sur verre, par conséquent transparentes, il suffira de placer l'appareil en face de la lumière du jour ou de celle d'une lampe. Dans ce cas, la face postérieure du stéréoscope est garnie d'un verre dépoli qui laisse passer la lumière également tamisée et intercepte les images des objets extérieurs.

Le stéréoscope ne donne pas seulement la sensation du relief : il produit aussi l'effet des lentilles convergentes ou des loupes, c'est-à-dire qu'il grossit les images, et par conséquent permet d'en étudier avec plus de netteté les détails. Dans ce but, et pour rendre encore le grossissement plus fort, on substitue aux prismes des combinaisons de lentilles, telles que celle représentée dans la coupe de la figure 324. Ce stéréoscope a été disposé par le docteur Helmholtz, professeur de physiologie à Heidelberg. Outre la modification apportée aux oculaires, il se distingue par un mécanisme spécial qui permet, soit de régler la distance des deux oculaires, soit d'augmenter ou de diminuer à volonté la distance des yeux ou des lentilles aux tableaux stéréoscopiques. Cette disposition est utile, parce que les images stéréoscopiques ne sont pas toujours placées de façon que la distance des points correspondants soit égale à celle des yeux, ou que leurs hauteurs au-dessus de la ligne de base soient égales. A l'aide des vis, on peut déplacer les oculaires dans leur plan, soit latéralement, soit de haut en bas. Le mouvement des tubes oculaires a pour objet d'amener les images photographiques aux foyers des lentilles.


Fig. 323. — Stéréoscope de réfraction. Vue extérieure.

Les monuments, les personnages, en un mot tous les objets saillants se présentent dans les stéréoscopes avec une vérité de relief étonnante, qui fait complètement illusion. Mais, comme le remarque fort justement Helmholtz, « l'avantage de la vision

stéréoscopique tombe surtout sous le sens en présence de reproductions d'objets qui se prêtent mal à la représentation par le dessin ou la peinture ordinaires; tels sont les rochers irréguliers, les blocs de glace, les objets microscopiques, les animaux, les forêts, etc. Les glaciers, en particulier, avec leurs fentes profondes éclairées par transparence à travers l'épaisseur de la glace, produisent un effet surprenant dans le stéréoscope. L'image unique donne ordinairement l'idée d'une agglomération confuse de taches grises, tandis que la combinaison stéréoscopique fait ressortir de la manière la plus palpable les formes des blocs de glace, ainsi que les effets de la lumière transmise et de la lumière réfléchie. La difficulté vient d'abord de ce que des formes aussi irrégulières que celles des blocs de glace ne peuvent pas être rendues nettement, même lorsqu'elles sont éclairées simplement par de la lumière incidente; elle est attribuable davantage à ce que la lumière transmise par la glace modifie complètement les lois ordinaires des ombres. La représentation stéréoscopique d'objets brillants, tels qu'une eau ridée par quelques vagues légères, produit encore des effets très surprenants. » (*Optique physiologique.*)

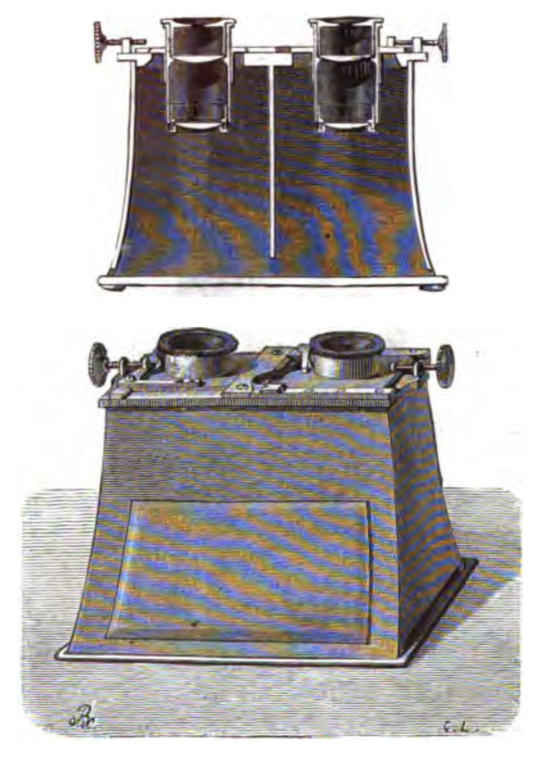


Fig. 324. — Stéréoscope d'Helmholtz.

On construit des stéréoscopes dans lesquels les rayons partis des deux images, avant de pénétrer dans les prismes ou lentilles

oculaires, subissent la réflexion totale à travers deux prismes à angle droit, dont la face hypoténuse (fig. 325) est disposée parallèlement à la direction des rayons qui arrivent dans les deux yeux. Il résulte de cette disposition que les deux images paraissent toutes deux symétriques de ce qu'elles sont dans la nature; elles se superposent, mais de telle façon que ce qui est à droite est vu à gauche, et réciproquement. Les images sont donc inverses, et par suite la perspective est aussi inverse, soit pour les reliefs, soit pour les creux. Les objets creux paraissent donc en relief et les reliefs en creux. Toutefois les ombres portées contrarient quelquefois cette illusion, ainsi que d'autres circonstances qui contribuent autant que la perspective ou les ombres à donner à la vision le sentiment du relief. Un exemple nous montrera la raison du renversement des images par le stéréoscope ainsi disposé, qui reçoit alors le nom de *pseudoscope*.

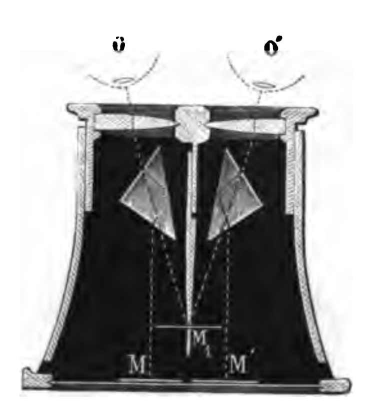


Fig. 325. — Le pseudoscope.

Considérons une pyramide tronquée vue d'en haut, et supposons que la lumière oblique ne donne pas d'ombre portée; il y aura seulement des différences d'éclat dans les faces latérales. Les deux vues stéréoscopiques devront être disposées comme l'indiquent les dessins A′ et A″, et alors ils donneront dans le stéréoscope le sentiment du relief. Mais dans le pseudoscope les deux dessins donnent des images symétriques et produisent l'effet que donneraient les deux vues stéréoscopiques A′ et A″. Or ces images, qui se superposent par l'effet de l'appareil, sont des vues d'une pyramide

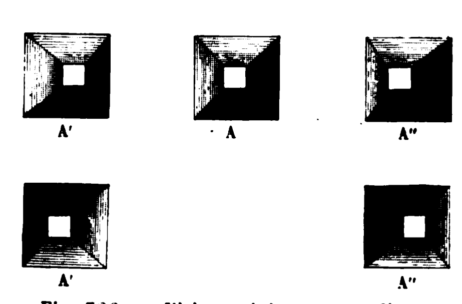


Fig. 326. — Vision stéréoscopique directe et inverse. Relief et creux.

semblable à la première, éclairée par la même lumière, mais qui serait creuse au lieu d'être en relief, puisque dans l'œil droit c'est la face de gauche qui est agrandie par la perspective, et le contraire a lieu dans l'image destinée à l'œil gauche.

L'effet du pseudoscope se produit naturellement quand on regarde des dessins où des ombres sont bien marquées, comme on représente les médailles. Alors, tantôt on voit l'objet en creux, tantôt on le voit en relief. Nous croyons avoir remarqué qu'on obtient plus aisément à volonté l'une ou l'autre des sen-



Fig. 327. — Vision en relief et vision en creux.

sations, si l'on a soin de placer convenablement le dessin à la lumière du jour, de manière que les ombres soient du côté où elles se trouveraient réellement, si le dessin était véritablement saillant dans un sens ou dans l'autre.

Le beau fac-simile d'une photographie lunaire, que nous devons à l'obligeance de M. Warren de la Rue et qui forme la planche XVII de la cinquième édition du Ciel, prête très aisément à l'expérience dont nous parlons. Les cratères volcaniques des montagnes lunaires y paraissent tantôt des troncs de cône creux, comme ils sont en réalité, tantôt au contraire ils semblent des ampoules renflées et inverses.

§ 3. APPAREILS BASÉS SUR LA PERSISTANCE DES IMPRESSIONS LUMINEUSES.

Nous avons décrit dans le chapitre XVII (*Première partie*) de ce volume certains phénomènes dus à la persistance des impressions lumineuses sur la rétine. Disons maintenant quelques mots d'un certain nombre de jouets basés précisément sur cette persistance; ces jouets peuvent d'ailleurs servir à l'étude du phénomène lui-même.

Le *thaumatrope* est le plus simple de tous. Il consiste en un petit rectangle de carton, mobile autour d'un axe qui joint les milieux des deux longs côtés ou encore en un disque qui tourne autour de l'un de ses diamètres. Sur une face du carton se trouve dessinée ou peinte une cage; sur l'autre face le dessinateur a figuré un oiseau. Qu'on imprime au rectangle un mouvement de rotation suffisamment rapide, les deux images persistent simultanément, et l'oiseau paraît enfermé dans la cage. On comprend qu'il y a mille manières de varier l'expérience par l'assemblage et la combinaison de toutes sortes de figures. On peut aussi employer deux disques perpendiculaires entre eux et tournant autour de leur diamètre commun; en ce cas, sur chacune des quatre faces on ne figure qu'une des parties du dessin : les quatre parties sembleront réunies en un seul dessin pendant le mouvement de rotation des disques. Le mouvement du carton s'obtient d'ailleurs fort simplement : aux deux extrémités de l'axe on attache deux fils de soie que l'on tient entre l'index et le pouce de chaque main : la torsion des fils dans le même sens détermine la rotation du rectangle.

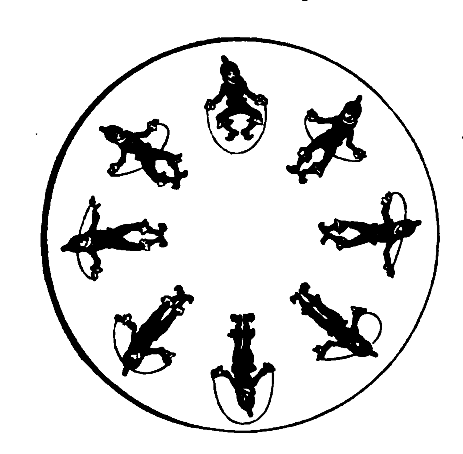


Fig. 528. — Disque du phénakisticope.

Le thaumatrope a été imaginé par le docteur Pâris.

Plateau a donné le nom de *phénakisticope*[1] à un petit appareil dont le jeu est également fondé sur la persistance des impressions lumineuses.

Deux disques de carton sont fixés sur le même axe, autour duquel leur système peut tourner avec une même vitesse. Un certain nombre de figures équidistantes sont dessinées sur la circonférence de l'un des disques. L'autre disque est percé du même nombre de fentes pareillement équidistantes, selon le sens des rayons du cercle. L'observateur, tenant l'instrument par sa poignée, fait tourner rapidement les deux disques, et place l'œil en face de l'une des fentes de manière à regarder au travers les images du disque opposé. A mesure que chaque fente passe devant son œil, l'image du dessin placé en regard se forme sur la rétine. Mais, en vertu de la persistance des impressions, l'observateur a encore la sensation de la première image quand vient se former la seconde, puis celle de la seconde au moment où arrive la troisième, et ainsi de suite. Si tous les dessins sont identiques, il est clair que la succession d'impressions visuelles, toutes semblables et suffisamment rapprochées, produira le même effet qu'une image unique et permanente : dans ce cas l'objet représenté semblerait immobile.



Fig. 329. — Phénakisticope à disque double.

Mais si, au contraire, les figures successives diffèrent entre elles de façon à représenter les divers aspects du même objet

1. Peu de temps après l'invention du physicien belge, un Allemand, Stampfer, imagina un appareil à peu près semblable; il lui donna le nom de *disques stroboscopiques*.

en mouvement, les sensations lumineuses toujours confondues se modifieront pour l'œil d'une manière continue, et l'objet représenté paraîtra lui-même en mouvement. Supposons que les dessins représentent un cadran avec une aiguille occupant les positions successives qui seraient données par un mouvement régulier de rotation. L'œil croira voir l'aiguille se mouvoir devant lui. Si, comme dans les figures 328 et 329, ce sont les positions diverses d'un sauteur de cordes, le personnage paraîtra effectuer en réalité les mouvements dont le dessinateur a marqué les phases.

Fig. 330. Phénakisticope.

Au lieu de deux disques placés en regard, on peut n'en employer qu'un seul; le phénakisticope prend alors la forme qu'indiquent les figures 330 et 331. Une tige métallique deux fois recourbée *tg*, munie d'un

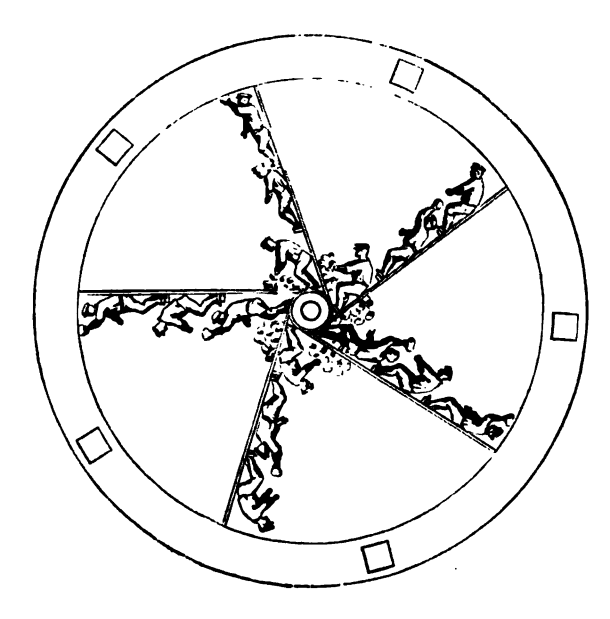


Fig. 331. — Disque du phénakisticope.

manche *m*, porte l'axe *ab*, qui peut tourner sur lui-même avec rapidité. On dévisse *v* et l'on introduit par son centre le disque

en carton, que l'on fixe contre l'appui, au moyen de la même vis convenablement serrée.

Le disque en carton porte à la fois les figures tracées sur chacun de ses secteurs, et les fentes correspondantes pratiquées vers sa circonférence. L'observateur se place alors au devant d'une glace, tient à la main l'instrument par son manche, et, l'œil à la hauteur de la fente supérieure, il regarde dans la glace les images réfléchies des dessins du disque. En imprimant alors, à l'aide du bouton *p*, un mouvement rapide de rotation au disque, les phénomènes déjà décrits se reproduisent.



Fig. 332. — Zootrope.

Nous avons supposé que le nombre des figures était égal au nombre des fentes. S'il était différent, plus grand ou moindre, alors les figures, outre leurs transformations, paraîtraient se mouvoir sur la circonférence, dans le même sens que le disque ou en sens contraire. On se rend compte aisément de ce phénomène. Supposons, par exemple, qu'il y ait 8 fentes seulement, et 9 figures. Quand la seconde fente vient à passer au devant de l'œil, le disque a tourné d'un angle égal au huitième de la circonférence, la seconde figure n'en est encore distante que d'un angle égal à la différence entre un huitième et un neuvième; on est porté à l'identifier avec la figure précédente, et l'objet paraît s'être déplacé du même angle.

On donne encore une autre figure au phénakisticope : c'est celle d'un cylindre creux tournant autour d'un pied monté sur l'axe du cylindre (fig. 332). Les fentes sont pratiquées sur le bord supérieur de cette sorte de vase et les dessins sont collés

au-dessous. On peut éclairer ceux-ci par transparence. Comme on s'est servi de l'appareil ainsi disposé pour reproduire les mouvements des animaux, par exemple ceux du cheval à ses différentes allures de *pas*, de *trot*, de *galop*, on lui donne aussi le nom de *zootrope*.

Dans tous ces appareils, pour que l'illusion se produise par le fait de la persistance de l'impression lumineuse, il est nécessaire que les divers dessins qui représentent l'objet en mouvement soient très habilement combinés, de façon à représenter les phases véritables, les changements que subit l'objet par le fait même du mouvement supposé. On verra plus loin quel service la photographie instantanée a pu rendre sous ce rapport en fournissant des séries d'images d'une fidélité irréprochable, et comment ce qui n'était à l'origine qu'un jouet a pu devenir un précieux moyen d'études.

CHAPITRE VI

PHOTOGRAPHIE

§ 1. PREMIERS ESSAIS DE FIXATION DES IMAGES DE LA CHAMBRE OBSCURE. DÉCOUVERTES DE NIEPCE ET DE DAGUERRE.

Quand on reçoit sur un écran blanc, placé au foyer de la lentille convergente de la *chambre noire*, les rayons lumineux émanés des objets extérieurs, il se forme, nous l'avons vu, une image merveilleusement fidèle de ces objets : c'est un véritable tableau en miniature du paysage en vue, avec toutes ses nuances de coloration et de lumière et tous ses détails les plus minutieux ; mais c'est une image fugitive, tout idéale pour ainsi dire, ou plutôt toute la réalité de cette image consiste dans le mouvement actuel des ondes lumineuses, suivant les lois de leur propagation à travers les divers milieux qui séparent notre rétine des objets eux-mêmes. Qu'on vienne à fermer l'ouverture qui donne accès à ces ondes, et à l'instant l'image s'évanouit.

Plus d'un observateur, depuis Porta, l'inventeur de la chambre noire, jusqu'à Niepce et Daguerre, les inventeurs de la photographie, ont dû concevoir le désir de retenir sur l'écran et d'y fixer ces images si exactes, et de prendre ainsi pour collaborateur, dans l'art de la peinture ou du dessin, la nature elle-même. Que fallait-il pour arriver à un tel résultat? Connaître une autre propriété de la lumière, celle que possèdent, en effet, les rayons lumineux d'impressionner chimiquement certaines

substances, de laisser à leur surface une trace visible de leur action, laquelle est généralement d'autant plus vive que l'intensité des rayons est elle-même plus considérable. Dès 1770, il est vrai, Scheele avait découvert la propriété du chlorure d'argent de noircir sous l'influence de la lumière, ou plutôt avait étudié à nouveau cette propriété connue des anciens alchimistes[1]. Il avait aussi reconnu que cette substance était plus sensible à l'action des rayons bleus ou violets (les plus réfrangibles du spectre) qu'à celle des rayons jaunes ou rouges. C'est sans doute en utilisant cette propriété qu'un habile physicien français des premières années de ce siècle, Charles, réussit à dessiner et montrait dans ses cours des silhouettes obtenues par l'action lumineuse. Comment les produisait-il? On l'ignore; mais le procédé qu'il employait avait sans doute quelque analogie avec celui que décrit Arago en ces termes, et qui permet d'obtenir des épreuves négatives d'une gravure :

« Placez une gravure sur du papier enduit de chlorure d'argent et exposez le tout à la lumière solaire, la gravure en dessus. Les tailles remplies de noir arrêteront les rayons; les parties correspondantes de l'enduit, celles que ces tailles touchent et recouvrent, conserveront leur blancheur primitive. Là, au contraire, où l'eau forte, le burin, n'ont pas agi, là où le papier a conservé sa demi-diaphanéité, la lumière solaire passera et ira noircir la couche saline. Le résultat nécessaire de l'opération sera donc une image semblable à la gravure par la forme, mais inverse quant aux teintes : le blanc s'y trouvera reproduit en noir, et réciproquement. » Malheureusement ces images négatives, comme les silhouettes de Charles, n'auraient pu se conserver au jour, parce que la lumière, continuant d'agir sur les parties non attaquées d'abord, aurait fini par recouvrir la feuille enduite de chlorure d'une teinte noire uniforme.

Wedgwood, en 1802, parvint à reproduire, sur des peaux ou des papiers enduits de chlorure ou d'azotate d'argent, les pein-

1. Fabricius, en 1556, publiait un ouvrage, le *Livre des métaux*, où la propriété du chlorure d'argent (ou *lune cornée*) de noircir à la lumière était constatée.

tures des vitraux d'église et aussi à copier des gravures; mais il ne crut pas possible d'appliquer son procédé à la reproduction des images de la chambre obscure. A la même époque, H. Davy parvint à obtenir des images de très petits objets en plaçant ceux-ci à une courte distance de la lentille du microscope solaire.

Ces tentatives étaient d'ailleurs incomplètes, en ce sens que ni Wedgwood ni Davy ne trouvèrent le moyen de fixer les images obtenues, de les empêcher de disparaître à la lumière du jour. Environ douze ans plus tard, un de nos compatriotes, Nicéphore Niepce (de Chalon-sur-Saône), qui consacrait ses loisirs à des études scientifiques, aborda ce problème de la reproduction photogénique des images de la chambre obscure. Mais, après un grand nombre d'essais infructueux, il fut obligé de renoncer à obtenir des vues naturelles, monuments ou paysages, à cause du temps fort long que mettaient à recevoir l'action lumineuse les substances dont il faisait usage. Jusqu'en 1829, époque de son association avec Daguerre, Niepce se borna à la *copie photographique des gravures;* mais, en revanche, il réussit complètement à fixer les images, problème que ni Charles, ni Wedgwood, ni H. Davy n'avaient su résoudre. Voici, en quelques lignes, en quoi consistait son procédé.

Sur une feuille de cuivre plaquée d'argent et parfaitement polie, il appliquait, à l'aide d'un tampon, un vernis composé de bitume sec de Judée dissous dans de l'huile de lavande. La plaque, chauffée doucement, se trouvait alors recouverte d'une couche uniforme et blanchâtre de bitume adhérente à sa surface. Placée en cet état au foyer de la chambre noire, elle laissait, au bout de quelque temps, apparaître de faibles linéaments de l'image. Pour rendre ces traits plus sensibles, Niepce eut l'idée de plonger la plaque dans un mélange d'huile de lavande et de pétrole. Et, en effet, il reconnut ainsi « que les régions de l'enduit *qui avaient été exposées à la lumière* restaient presque intactes, tandis que les autres se dissolvaient rapidement et laissaient ensuite le métal à nu. Après avoir lavé la plaque avec

de l'eau, on avait donc l'image formée dans la chambre noire, les clairs correspondant aux clairs et les ombres aux ombres (en un mot, une *image positive* de la gravure). Les clairs étaient formés par la lumière diffuse provenant de la matière blanchâtre et non polie du bitume; les ombres par les parties polies et dénudées du miroir, à la condition, bien entendu, que ces



Fig. 333. — Nicéphore Niepce.

parties *se miraient* dans des objets sombres; à condition qu'on les plaçait dans une telle position, qu'elles ne pussent pas envoyer *spéculairement* vers l'œil quelque lumière un peu vive. Les demi-teintes, quand elles existaient, pouvaient résulter de la partie du vernis qu'une pénétration partielle du dissolvant avait rendue moins mate que les régions restées intactes. » (Arago.)

Daguerre commença par perfectionner la méthode de Niepce : il substitua au bitume de Judée, employé par Niepce, l'iodure d'argent qui, sous l'action des rayons lumineux, noircit avec rapidité. De la sorte, il parvint à réduire le temps de l'exposition de la plaque aux rayons lumineux ; mais ce temps était encore de plusieurs heures. On comprend donc pourquoi, même avec ces perfectionnements, il était à peu près impossible d'obtenir des épreuves satisfaisantes des images de la chambre obscure : pendant que les objets éclairés par le Soleil portaient leurs ombres d'un côté au début de l'expérience, l'astre entraîné par le mouvement diurne se déplaçait, et avec lui les ombres portées, qui de la gauche passaient à la droite. Il en résultait une confusion dans les images, dont la teinte devenait plate et uniforme et dont le relief finissait ainsi par disparaître.

La plaque iodurée exposée au foyer de la chambre noire recevait l'empreinte de l'image ; mais celle-ci néanmoins n'existait encore pour ainsi dire qu'à l'état latent. Il restait à la développer. Après de nombreux essais, Daguerre trouva que l'huile de pétrole avait la propriété de rendre les tons plus visibles. qu'elle était ce que l'on a depuis appelé une substance *révélatrice*. Enfin, bientôt il reconnut qu'il est préférable d'employer dans ce but les vapeurs de mercure : exposée à ces vapeurs, la plaque iodurée, impressionnée par la lumière, laissait apparaître avec la plus grande netteté tous les détails d'ombre et de lumière de l'image formée au foyer de la chambre noire.

On voit donc que, si l'idée première et la gloire de l'invention de la photographie reviennent de droit, pour une bonne part, à Niepce, qui n'eut pas le bonheur de jouir lui-même de son triomphe, et de partager avec son associé Daguerre l'honneur de la reconnaissance nationale décernée en toute justice aux deux inventeurs[1], c'est Daguerre qui a, par l'invention

1. Une loi fut votée, en juillet 1839, pour accorder à Daguerre et à Niepce fils deux pensions viagères, la première de 6000 et la seconde de 4000 francs, en échange de l'abandon fait par eux au public des procédés de photographie dont ils étaient inventeur ou héritier. Niepce père était mort en 1833.

d'une méthode originale, porté à sa perfection l'art nouveau de la reproduction, par la lumière, de tous les détails d'une vue naturelle, d'un site de paysage, d'un portrait, d'une scène quelconque. Bien des perfectionnements ont été apportés depuis à cette méthode qui n'est plus elle-même pratiquée, et à laquelle on a substitué mille procédés plus expéditifs ou moins coûteux; mais, dès le début, les épreuves daguerriennes ont atteint un fini, une précision qui, depuis, n'ont pas été dépassés. D'ailleurs, au point de vue historique et scientifique, comme application des lois des phénomènes physiques, le procédé de Daguerre a une importance qui ne nous permet pas d'en omettre la description détaillée. L'enthousiasme avec lequel il a été accueilli à son origine par les savants, par le public comme par les artistes, n'a rien que de légitime, si l'on songe aux immenses services qu'il a rendus lui-même et que les procédés nouveaux ont de plus en plus multipliés : la géographie, toutes les sciences physiques et naturelles, l'ethnographie, l'architecture, et même les arts de la peinture et du dessin ont eu part à ces services, qui ne font que s'étendre tous les jours.

Voyons donc quel était à l'origine, c'est-à-dire en 1839, le procédé de Daguerre, et comment il était parvenu à reproduire les images de la chambre noire à l'aide de l'appareil qu'on nommait alors le *daguerréotype*.

§ 2. DAGUERRÉOTYPIE OU PHOTOGRAPHIE DAGUERRIENNE.

Comme Niepce, Daguerre employait une feuille de cuivre plaquée d'argent, de l'épaisseur d'une forte carte. Il divisait lui-même en cinq opérations la série des manipulations qui constituaient son procédé et dont voici la description d'après la notice publiée par l'inventeur.

La première opération consistait dans le polissage et le nettoyage de la plaque. Avec du coton imbibé d'huile d'olive et de la ponce pulvérisée très fine, la surface de l'argent était d'abord

polie avec beaucoup de soin; on enlevait alors la couche grasse avec un tampon mouillé d'eau étendue d'acide nitrique. La plaque, chauffée fortement, était de nouveau polie à la ponce, mais à sec, jusqu'à ce que l'argent fût parfaitement bruni.

En cet état, la plaque pouvait recevoir la couche sensible, seconde opération qui consistait à exposer la surface polie aux vapeurs qui se dégageaient spontanément de quelques fragments d'iode. Ceci se faisait dans l'obscurité, et ce n'est qu'à la clarté d'une bougie que l'opérateur jugeait si le résultat convenable était obtenu; la couche d'argent devait avoir pris alors une belle couleur jaune d'or. Selon la température, il fallait une exposition de cinq minutes à une demi-heure.

On mettait alors la plaque ainsi préparée au foyer de la chambre obscure, en ayant soin de ne pas laisser plus d'une heure d'intervalle entre cette troisième opération et la précédente. Les objets dont on voulait reproduire l'image devaient être éclairés par la lumière directe du soleil. Après une exposition dont la durée variait avec l'heure du jour, avec la saison, et qui pour Paris était de 3 minutes au moins, de 30 minutes au maximum, l'action photogénique de la lumière était complète. La plaque sur laquelle rien n'était encore visible, et qu'il fallait soustraire à toute lumière, portait l'empreinte fidèle de tous les objets qui avaient concouru à lui envoyer des rayons lumineux.

Il restait à faire apparaître cette image cachée sous son voile, et à la fixer de manière à la mettre à l'abri de toute destruction ultérieure. Voici comment Daguerre procédait pour ces deux dernières opérations :

La plaque était portée à l'intérieur d'une boîte (fig. 334) et la face impressionnée, inclinée à 45 degrés, était soumise à l'action des vapeurs qui s'échappaient d'une capsule pleine de mercure chauffée à une température de 60 à 75 degrés centigrades. Au bout de quelques minutes, l'image commençait à paraître, et se dessinait de plus en plus nette et précise : ce dont on s'assurait en s'éclairant de la lumière d'une bougie. Quand

la température du mercure s'était spontanément abaissée à 45 degrés environ, l'opération était finie et l'épreuve arrivée à sa perfection. On pouvait alors la conserver sans altération pendant plusieurs mois, à une condition toutefois, celle d'éviter de la regarder souvent et au grand jour.

« Le but de la cinquième opération, dit Daguerre, est d'enlever de la plaque l'iode, qui, autrement, lorsque l'épreuve serait exposée trop longtemps à la lumière, continuerait à se décomposer et la détruirait. »



Fig. 334. — Boite à mercure pour la révélation des images daguerriennes.

Cette interprétation était-elle scientifiquement bien exacte? Nous le verrons plus loin. Toujours est-il que l'inventeur parvenait à son but en agitant la plaque dans une solution chauffée de sel marin, ou mieux dans une solution d'hyposulfite de soude, puis en la lavant à l'eau très chaude. On reconnaît que cette dernière opération a réussi quand toute trace de la primitive couche jaune d'or a disparu. En mettant ensuite l'épreuve sous verre pour soustraire la surface de l'image à tout frottement, elle se conservait intacte, même exposée au grand jour.

Telle était, en résumé, et sauf des détails de manipulation qui n'ont pas d'intérêt au point de vue scientifique, la méthode inventée par Daguerre. Elle reçut bientôt quelques perfectionnements dont nous allons dire un mot, après quoi nous donnerons la description des procédés de photographie qui n'ont pas tardé à détrôner l'invention première, sans rien ôter, du reste, au mérite des deux hommes qui ont contribué à la découvrir.

chimique des phénomènes que nous venons d'étudier. Nous n'avons rien à dire du côté purement optique des phénomènes; la formation des images au foyer de la chambre obscure a été complètement expliquée dans les chapitres consacrés soit aux phénomènes lumineux et à leurs lois, soit aux instruments d'optique proprement dits. Mais que se passe-t-il à la surface de la plaque ; comment se forment les images ; quel est le mode d'action de la lumière et comment les images, une fois formées, mais encore invisibles, deviennent-elles visibles dans tous leurs détails?

On a déjà vu que l'exposition de la plaque argentée aux vapeurs spontanées de l'iode donne lieu à la formation d'un composé chimique, l'*iodure d'argent*. C'est ce composé qui recouvre la surface primitivement blanche du métal d'une teinte qui varie suivant l'épaisseur, depuis le jaune paille, le jaune d'or ou orange, jusqu'au rouge, au bleu, au violet. Disons d'abord que ce phénomène de coloration n'est pas dû à la couleur de l'iodure d'argent, qui est blanc, mais qu'il s'agit d'un phénomène où l'interférence des rayons lumineux joue le principal rôle, comme nous l'avons vu dans le chapitre de cet ouvrage consacré aux couleurs des lames minces. M. Dumas a évalué le poids de la couche d'iodure formée à la surface d'une plaque daguerrienne, et il en a conclu l'épaisseur approchée de la couche elle-même. Cette détermination est assez curieuse pour que nous la rapportions d'après le célèbre chimiste lui-même.

« Une plaque de 5760 millimètres carrés de surface, ayant été amenée à la nuance jaune-paille par son exposition à la vapeur d'iode, fut rapportée sur une balance très délicate, où l'on avait fait exactement la tare : il y avait une augmentation de poids certaine, évidente, mais elle ne s'élevait pas à un demi-milligramme. Quand la nuance fut du jaune d'or, l'augmentation du poids arriva au demi-milligramme. En prolongeant la durée de l'action de la vapeur d'iode par delà le temps nécessaire, en quadruplant cette durée par exemple, j'obtins

des effets très appréciables à la balance : une augmentation de poids de deux milligrammes. Je supposai que le quart de cette quantité aurait suffi pour former à la totalité de la surface la dose d'iodure nécessaire à la production de l'image. Mais en calculant le poids d'iodure d'argent que cet iode représente, en calculant le volume d'iodure qui correspond à ce poids, on arrive à se rendre compte de l'épaisseur de la couche d'iodure d'argent déposée à la surface de la plaque. Elle n'est pas égale à UN MILLIONIÈME DE MILLIMÈTRE. »

Une fois la plaque métallique recouverte d'iodure d'argent, et aussi de bromure d'argent après qu'elle a été soumise à l'action des substances accélératrices, que se passe-t-il quand elle est impressionnée par la lumière ? Quelle influence les ondes lumineuses ont-elles sur la couche sensible ? Sur ce point, les opinions sont partagées. D'après l'opinion de M. Dumas, opinion émise à l'époque où la découverte de Daguerre fut rendue publique, l'action de la lumière serait purement mécanique : elle aurait pour effet de soulever ou de fendiller la couche de l'iodure d'argent, en permettant ainsi au mercure d'arriver au contact de l'argent métallique, tandis que l'iodure non fendillé resterait imperméable. En examinant au microscope la couche mercurielle déposée après la troisième opération, le célèbre chimiste reconnut que cette couche est composée de granules de mercure très irréguliers (d'un diamètre égal à environ la 800e partie d'un millimètre). Les parties blanches ou lumineuses sont recouvertes de ces granules ; les ombres n'en présentent presque pas ; les demi-teintes en sont moins garnies que les blancs ; en un mot, les granules de mercure sont déposés en quantité proportionnelle aux érosions de l'iodure d'argent.

D'autres savants croient que les choses se passent d'une autre façon. Selon eux, l'iodure d'argent, sous l'action des ondes lumineuses, est en partie décomposé ; il se transforme en sous-iodure qui, en contact avec le proto-iodure de mercure, donne naissance à de l'iodure rouge et à du mercure métallique.

D'après cette théorie qui a été exposée, dès 1843, par MM. Choiselat et Ratel, « les blancs sont produits par une poussière, d'une grande ténuité, d'amalgame d'argent simplement déposé sur la plaque ; ces blancs sont d'un ton d'autant plus vif que cette poussière est plus abondante et plus riche en argent ; quant aux noirs, ils sont le résultat du dépôt d'un argent extrêmement divisé, mêlé mécaniquement à une très faible quantité de mercure provenant du lavage. »

Quelle que soit du reste la théorie vraie, que les granules soient formés d'amalgame ou de mercure métallique, leur dépôt à la surface de la plaque forme un assemblage évidemment instable, et la nécessité de les protéger contre les altérations extérieures est la même dans les deux cas. De là l'importance de l'opération du fixage, qui, pour les épreuves daguerriennes, s'obtenait, nous l'avons vu, par le dépôt d'une mince couche transparente d'un sel d'or.

CHAPITRE VII

PHOTOGRAPHIE SUR PAPIER ET SUR VERRE

§ 1. PHOTOGRAPHIE SUR PAPIER. — INVENTION DE TALBOT. — PROCÉDÉ BLANQUARD-ÉVRARD.

De même que les noms de Niepce et de Daguerre sont attachés à l'invention première de la photographie sur plaque métallique, ceux de Talbot et de Blanquard-Évrard caractérisent la découverte de la photographie sur papier : à Niepce et à Talbot la gloire d'avoir conçu l'idée, à Daguerre et à Blanquard-Évrard, celle d'avoir réalisé pratiquement et perfectionné le procédé du premier inventeur.

Moins de deux années s'étaient écoulées depuis que François Arago et Gay-Lussac avaient fait leurs rapports à la Chambre des députés et à la Chambre des pairs sur l'invention du daguerréotype, quand une lettre d'un savant anglais, Talbot, lue à l'Académie des sciences par Biot, fit connaître les procédés que ce savant avait trouvés pour reproduire directement sur papier sensible les images de la chambre noire. Voici, d'après cette communication, en quoi consistait le procédé de Talbot :

« On lave, avec une solution de nitrate d'argent dans l'eau pure, un des côtés d'une feuille de papier que l'on marque pour pouvoir la reconnaître, et on la fait sécher doucement. On la plonge ensuite pendant deux minutes dans une dissolution d'iodure de potassium. On forme, par le mélange d'une dissolution de nitrate d'argent avec une dissolution saturée d'acide gallique auquel on ajoute un peu d'acide acétique, du *gallonitrate*

d'argent, avec lequel on lave le papier ioduré. On plonge le papier ainsi humecté dans l'eau, on le sèche avec le papier brouillard, et on a ainsi obtenu le papier *calotype*. On le met au foyer de la chambre obscure, une minute a suffi pour y imprimer l'image invisible encore, mais qui apparaît dans tous ses détails lorsque, après avoir lavé une fois le papier dans le gallonitrate d'argent, on le chauffe doucement devant le feu. Pour fixer le tableau, il faut l'humecter avec une dissolution de bromure de potassium, le laver encore et le sécher. Les dessins ainsi fixés restent transparents, et l'on peut en tirer des copies en se servant d'une deuxième feuille de papier *calotype* qu'on presse contre le tableau, et qu'on expose ainsi à la lumière. »

Dans ce procédé, nous retrouvons les mêmes principes physiques que dans ceux de Niepce et Daguerre. Une feuille est recouverte d'une couche *sensible*, *impressionnable* à la lumière; elle est soumise à cette influence au foyer de la chambre noire. Mais, encore invisible à la sortie de la chambre, l'image a besoin de l'action d'une substance spéciale, d'une opération qui la *révèle;* puis, pour échapper aux causes de destruction ultérieure, il reste une dernière opération, celle du *fixage*.

Tous les procédés ultérieurs de photographie, et ils sont innombrables, sont basés sur les mêmes principes, nécessitent les mêmes opérations fondamentales.

En quoi le procédé de Talbot, qui au début, fournissait des épreuves défectueuses à bien des égards, marquait-il un progrès dans l'art nouveau? Le voici. Les plaques de Daguerre étaient lourdes et coûteuses, embarrassantes en voyage, d'un maniement peu commode. De plus l'image, malgré son admirable netteté, le fini de ses détails, offre un miroitement qui rend l'examen difficile : on ne la voit que dans de certaines conditions d'éclairement. Enfin l'épreuve est unique : il faut recommencer autant de fois l'opération qu'on veut avoir de copies du même objet. A tous ces points de vue, mais surtout au dernier, celui de la reproduction des copies avec une même épreuve, le procédé de Talbot mettait sur la voie de progrès

considérables dans l'art de la photographie, et ces progrès se sont en effet réalisés en quelques années.

D'abord un de nos compatriotes, M. Blanquard-Évrard (de Lille), parvint, en modifiant le procédé Talbot, à obtenir des épreuves sur papier de plus en plus parfaites, et, en même temps qu'il perfectionnait les résultats, il trouvait les moyens de réussir presque à coup sûr : ce qui était loin d'arriver avec le procédé décrit plus haut. Décrivons succinctement sa méthode.

Comme le procédé Talbot, cette méthode comprend deux opérations principales : en premier lieu, on obtient, à l'aide de la chambre noire, une épreuve *négative* de l'image à reproduire, c'est-à-dire une image inverse, les lumières étant figurées par des *noirs*, les ombres par des *clairs*, et toutes les demi-teintes par des mélanges en proportion exacte de ces deux teintes extrêmes; à l'aide de cette épreuve négative, on tire des épreuves *positives* où l'image reprend son apparence normale, épreuves qu'on peut d'ailleurs obtenir en nombre indéfini.

L'épreuve négative se fait sur papier sensible, et c'est surtout dans la préparation de ce papier que réside le progrès dû à M. Blanquard-Évrard. Au lieu d'enduire seulement la surface de la couche sensible, il imprégnait toute l'épaisseur d'iodure d'argent; plaçant la feuille encore humide entre deux glaces, il la disposait ainsi au foyer de la chambre noire. Voici, du reste, comment s'obtenait le papier photogénique. On choisissait du papier collé, mince, uni et bien homogène, qu'on plaçait par une de ses faces sur une solution de nitrate d'argent, en ayant soin que l'autre face ne fût pas mouillée par le liquide, et que le contact se fît complètement sans interposition de bulles d'air. Après quelques minutes, la feuille était étendue sur une glace, la face humide en dessus, et on l'y laissait sécher dans l'obscurité. Le papier sec était alors immergé dans une solution d'iodure et de bromure de potassium, où, une double décomposition chimique ayant lieu, il se formait à la fois de l'iodure d'argent et du bromure d'argent, les deux substances impressionnables qui pénétraient toute l'épaisseur du papier.

En employant, humide encore, le papier photogénique, on obtient rapidement l'image, ce qui est surtout indispensable pour la reproduction des objets animés, notamment pour les portraits. Le papier sec exige une exposition plus longue à la lumière : on l'emploie, en voyage, pour les vues, les paysages, les monuments.

Retiré de la chambre noire, le papier ne laisse rien voir à sa surface, comme les plaques daguerriennes. Mais ici le *révélateur* est une solution d'acide gallique ou pyrogallique, dans laquelle on plonge la feuille de papier. Cet acide organique réduit les sels d'argent partout où il y a eu impression de la lumière, et les parties ainsi impressionnées se couvrent d'une teinte noire de gallate d'argent d'autant plus prononcée que l'action de la lumière a été plus vive. L'épreuve est donc négative. Pour la rendre inaltérable à l'action de la lumière, on la lave dans une dissolution d'hyposulfite de soude ou dans un bain de bromure de potassium : les sels d'argent qui n'ont pas été décomposés sont ainsi enlevés, et l'image est fixée.

A l'aide de l'image négative ainsi obtenue, il s'agit maintenant de produire des épreuves positives, ce à quoi l'on parvient par un procédé analogue à celui qui servait primitivement à Niepce pour copier des gravures. On imbibe de cire l'épreuve négative, de manière à rendre le papier translucide ou même transparent. Il suffit alors de poser cette épreuve sur une feuille de papier sensible, et d'exposer les deux feuilles maintenues entre deux glaces, soit à la lumière directe du Soleil, soit à la lumière du jour ou diffuse. Sous l'influence de la lumière, la feuille de papier sensible est impressionnée sous les blancs de l'épreuve négative, de sorte qu'une image positive se fait à sa surface, laquelle est d'abord invisible, mais est ensuite révélée par l'acide gallique, tout comme l'a été l'épreuve primitive.

§ 2. PHOTOGRAPHIE SUR VERRE ALBUMINÉ.

La photographie sur papier devint rapidement populaire, et si ses épreuves étaient à l'origine d'une finesse beaucoup moindre que les plaques daguerriennes, si les détails minutieux des épreuves sur métal disparaissaient à cause du grain et de la texture fibreuse du papier, en revanche les nouvelles images étaient plus appréciées des artistes. Du reste, dans cette seconde phase de l'art photographique, les progrès se multiplièrent avec une étonnante rapidité.

On fit d'abord des épreuves sur papier ciré, gélatiné, dont la surface très polie permettait la reproduction des détails les plus fins. Mais bientôt une découverte, due à un neveu de Niepce, à M. Niepce de Saint-Victor, mit la photographie dans une voie nouvelle, qui est encore la plus généralement suivie. Au lieu de prendre, comme Daguerre, une plaque métallique, ou, comme Talbot et Blanquard-Évrard, une feuille de papier pour y faire le dépôt de la couche sensible, c'est sur une plaque de verre, sur une feuille de glace bien polie que M. Niepce de Saint-Victor réussit à déposer la substance impressionnable et à produire une épreuve négative. La transparence du verre, son inaltérabilité, le poli de sa surface, son bon marché, tous ces motifs ont peu à peu conduit les photographes à le substituer et aux plaques métalliques de Daguerre et au papier sensibilisé. Avant d'arriver au procédé le plus généralement suivi aujourd'hui, qui est la photographie sur collodion, décrivons donc encore très rapidement le procédé de M. Niepce de Saint-Victor.

La couche sensible dont il recouvrait la plaque de verre était formée d'un liquide composé lui-même de la façon suivante : albumine obtenue en battant des blancs d'œufs jusqu'à la réduction en neige; iodure de potassium 1 pour 100, eau 25 pour 100. La glace, recouverte d'une couche bien régulière, est mise à sécher dans l'obscurité, ce qui demande à peu près un jour.

On l'immerge alors dans une solution d'acétonitrate d'argent, et l'on a une plaque prête à recevoir l'action de la lumière. Une exposition de quinze à trente secondes au foyer de la chambre noire suffit.

L'épreuve négative obtenue, on tire des épreuves positives comme nous l'avons dit plus haut. Ces épreuves étant tirées sur papier, l'inconvénient du grain s'y retrouve, mais avec cette

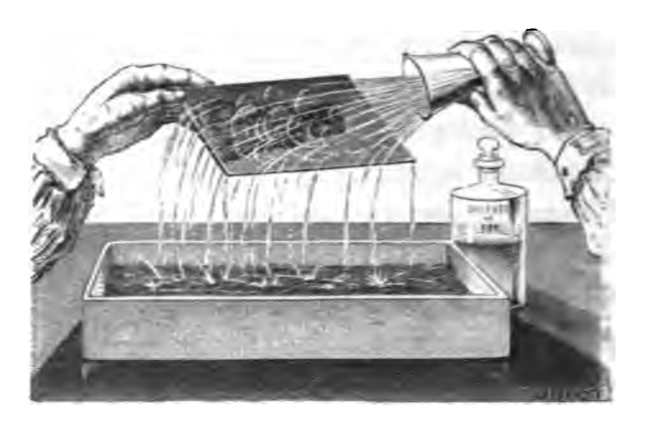


Fig. 336. — Développement de l'image.

différence considérable que, l'épreuve primitive y étant elle-même soustraite, la finesse des contours, des traits, des nuances y est parfaite, et que cette finesse n'est altérée qu'une fois au lieu de deux.

Du reste, rien n'empêche d'éviter même cet inconvénient en tirant des épreuves positives sur verre albuminé. C'est ce qu'on fait surtout pour celles qui sont destinées au stéréoscope, la transparence étant une condition pour l'examen stéréoscopique par la lumière transmise.

§ 3. PHOTOGRAPHIE SUR COLLODION.

Schœnbein découvrit, en 1846, un produit qui attira grandement l'attention des savants et du public. On crut un instant, en effet, que cette substance, connue sous les noms

de *fulmicoton*, *coton-poudre* ou *pyroxyline*, détrônerait la poudre ordinaire. La pyroxyline se prépare d'une façon très simple en trempant, pendant une demi-minute, du coton cardé dans l'acide azotique monohydraté, en lavant à grande eau et en séchant à l'air. Elle se dissout dans un mélange d'alcool et d'éther.

C'est à cette dissolution, qui est employée en chirurgie et en médecine, qu'on donne le nom de *collodion*. En 1851, un photographe anglais, M. Archer, réussit à substituer le collodion à l'albumine dans la préparation des plaques de verre qui servent à obtenir les épreuves négatives[1]. Le rôle que jouent l'albumine et le collodion est le même, mais les épreuves faites par le dernier procédé exigent un temps de pose encore moins long, et l'on obtient des effets pour ainsi dire instantanés. De là la possibilité de reproduire des vues qui renferment des êtres animés, des personnages, de saisir l'expression rapide de la physionomie dans les portraits, de représenter des corps en mouvement : les nuages entraînés par le vent, les vagues d'une mer agitée, les animaux, etc., etc.

Les procédés de photographie au collodion ont été variés de cent manières ; en indiquant ce qu'il y a d'essentiel dans l'un d'eux, nous ferons comprendre tous les autres. Mais il faut dire qu'ici, comme dans le daguerréotype, comme dans la photographie sur papier, sur verre albuminé, nous laissons de côté le détail des manipulations, détail qui a son importance, car il est le plus souvent une condition indispensable de la réussite. Comme notre intention n'est pas d'écrire ici un manuel, même abrégé, de photographie, mais de faire comprendre les principes physiques de cet art aujourd'hui si répandu, le lecteur appréciera les motifs de notre réserve.

Voici une formule de collodion normal, c'est-à-dire tel qu'on

1. Un photographe français, M. Legray, avait eu dès 1850 l'idée de se servir du collodion à la place de l'albumine ; mais il ne réussit point dans ses essais, qui sont mentionnés dans son *Traité pratique de photographie*, publié en juin 1850 à Paris, et un mois après à Londres.

le prépare avant le mélange des substances qui doivent contribuer à la production de la couche sensible :

Éther sulfurique rectifié	600
Pyroxyle	12
Alcool à 40 degrés	300

La liqueur iodurée est une solution alcoolique d'iodures de potassium, de cadmium, d'ammonium et de bromures des mêmes métaux. On y ajoute un fragment, une paillette d'iode. Le liquide formé du mélange de ces deux solutions s'étend, comme on fait pour l'albumine, sur la glace bien nettoyée. Un peu avant que la couche ne soit sèche, on plonge la glace très rapidement dans un bain de nitrate d'argent. La formation d'iodure, de bromure d'argent qui en résulte produit une couche d'apparence blanchâtre et opaque : c'est la couche photogénique. Cette opération se fait toujours dans l'obscurité.

La glace est alors placée dans le châssis de la chambre noire, et l'on peut opérer, c'est-à-dire exposer à l'action de la lumière. En quelques secondes[1] l'impression est produite, et il n'y a plus qu'à soumettre l'épreuve aux opérations du développement et de la fixation de l'image, ce qui se fait au moyen d'une dissolution aqueuse de sulfate de fer additionnée de quelques gouttes d'acide pyrogallique, puis du lavage à l'hyposulfite de soude : cette dernière opération débarrasse le négatif de l'excès d'iodure d'argent qui, sans cela, noircirait à la lumière et altèrerait l'image.

En albuminant préalablement la plaque, avant de la recouvrir de la couche au collodion, on peut opérer plusieurs jours après la préparation. C'est le procédé Taupenot au collodion sec.

L'épreuve négative obtenue, on procède comme nous l'avons dit pour la production d'épreuves positives.

1. Le *temps de pose*, autrement dit le nombre de secondes pendant lesquelles la glace doit rester exposée à l'action de la lumière, est extrêmement variable. Il dépend de nombreuses conditions dont l'opérateur est juge, de la vivacité de la lumière qui frappe les objets à reproduire, de la qualité du collodion, des couleurs des objets, etc.

§ 4. L'APPAREIL OPTIQUE DU PHOTOGRAPHE.

Maintenant que nous avons donné une idée des principales méthodes de photographie qui se sont succédé depuis l'invention de Niepce et de Daguerre, il est bon de revenir sur un point qui leur est commun à toutes, et d'entrer dans quelques détails sur l'appareil optique, c'est-à-dire sur la disposition de la chambre noire avec ses accessoires les plus essentiels.

La chambre noire se compose d'une boîte rectangulaire en bois, reposant sur une planchette à coulisse, et formée elle-même de deux ou plusieurs compartiments ou tiroirs qui, en glissant entre les coulisses, permettent d'allonger ou de diminuer à volonté, dans le sens horizontal, l'une des dimensions de la boîte. Au lieu de boîtes à compartiments multiples, on emploie beaucoup des chambres noires dont les parois sont rendues mobiles par leur forme en soufflet.



Fig. 337.— Chambre noire photographique.

En avant, est percée une ouverture à laquelle on fixe l'objectif, c'est-à-dire le tube AB où se trouvent enchâssés les verres ou lentilles destinées à produire une image réelle des objets.

La face postérieure de la chambre noire est disposée de façon à recevoir, dans une rainure, le châssis G qui porte la feuille ou la plaque sur laquelle la lumière doit dessiner l'image. Mais, avant de donner accès à la lumière sur la feuille sensible, il faut pouvoir s'assurer que l'image est bien au foyer : ce que l'opérateur vérifie en plaçant d'abord dans le châssis une glace dépolie, à la surface de laquelle l'image se forme et peut être

vue par transparence. Si cette image manque de netteté, c'est que la glace n'est pas bien au foyer; et alors on corrige ce défaut en faisant mouvoir les tiroirs de la chambre dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il faut raccourcir ou allonger la distance pour trouver le foyer exact : c'est ce qu'on nomme

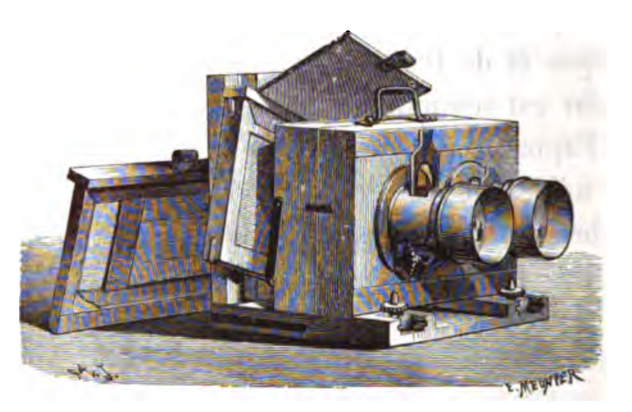


Fig. 338. — Chambre noire des photographes à double objectif.

mettre au point, opération en tout semblable à celle que nous avons indiquée pour la mise au point des oculaires des instruments d'optique, télescopes ou microscopes.



Fig. 339. — Appareil photographique de campagne à soufflet.

La netteté de l'image dépend de la bonté de l'objectif, qui doit être achromatique et dépourvu d'aberration de sphéricité.

Les figures 340 et 341 donnent en coupe la disposition de plusieurs objectifs, les uns simples, les autres à verres combinés. L'objectif simple exige un diaphragme à très petite ouverture, afin d'éviter l'aberration de sphéricité, laquelle chan-

gerait, sur l'image, les lignes droites de la nature en lignes plus ou moins courbées. La quantité de lumière qui passe par une ouverture étroite étant faible, cet objectif nécessite un temps de pose plus considérable. On s'en sert plus spécialement pour les vues, les paysages, les monuments, les reproductions d'objets inanimés, de natures mortes, comme on dit en style d'art.

L'objectif à verres combinés (fig. 341), dont le diaphragme est placé en arrière des systèmes de lentilles, permet l'introduction d'une plus grande somme de lumière ; il est employé

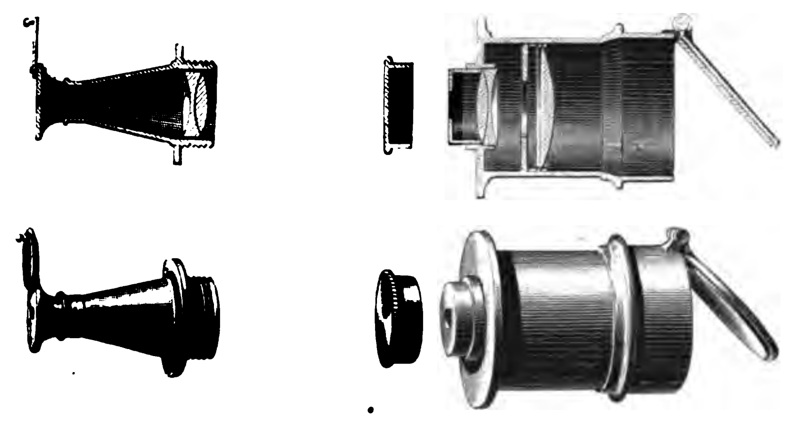


Fig. 340. — Objectif simple.

Fig. 341. — Objectif composé, avec glace redressante.

de préférence pour les portraits, parce qu'il n'exige pas une pose aussi longue.

Dans le daguerréotype, l'image se faisant telle quelle, mais renversée sur la plaque même, en la renversant de haut en bas pour la voir droite elle était symétrique de l'objet, c'est-à-dire que la droite s'y voyait à gauche, et réciproquement. Pour obtenir une image droite, on adaptait à l'objectif, soit une glace inclinée à 45 degrés, soit un prisme où la réflexion totale se faisait sur la face hypoténuse. La photographie sur verre n'exige point cette précaution, puisque c'est l'épreuve négative qui se trouve renversée et symétrique, et qu'en la retournant pour obtenir l'épreuve positive, celle-ci se trouve avoir la position normale.

Dans les premières années qui suivirent la découverte de Daguerre, les opérateurs les plus habiles, malgré le soin qu'ils apportaient aux diverses manipulations qui constituaient le procédé, échouaient souvent et n'obtenaient que rarement des épreuves possédant la netteté de l'image qu'ils venaient d'observer sur la glace dépolie. On crut d'abord que cela tenait à la difficulté de faire coïncider rigoureusement le plan de la plaque avec le plan dépoli du verre. Un photographe, M. Claudet, cherche à remédier à ce dernier inconvénient et y parvint. Or le résultat fut contraire à son attente. Les épreuves obtenues furent constamment confuses, mal définies. Après de nouvelles recherches, il découvrit la cause de cet insuccès : c'est que le foyer lumineux, ou visuel, ne coïncide pas, en effet, avec le foyer des rayons chimiques, avec le foyer photogénique. Et ce défaut de coïncidence dépend à la fois et de la nature des objectifs, et de la distance des objets, et enfin de l'intensité de la lumière.

Le problème a été résolu pratiquement depuis par les opticiens qui construisent des objectifs pour lesquels le foyer photogénique coïncide avec le foyer visuel. Quand l'objectif d'un appareil ne jouit pas de cette propriété, il importe que le photographe l'étudie avec soin, et, par des essais multipliés, arrive à reconnaître la position pour laquelle l'image sur le verre dépoli se trouvera coïncider avec le foyer chimique, de manière à produire sur la glace sensibilisée l'image la plus nette possible.

N'oublions pas, en terminant, de dire que les qualités d'un bon objectif doivent varier avec la nature de son emploi. C'est ce qu'exprime fort bien le savant vice-président de la Société française de Photographie, M. Davanne : « L'objectif est l'âme de l'appareil, dit-il, et, pour être parfait, il devrait répondre à tant de conditions, souvent opposées, qu'un seul instrument ne peut les réunir toutes. Il a donc fallu créer des objectifs divers en vue des services qu'on avait à leur demander. Pour le portrait, on a dû sacrifier la netteté générale et l'étendue du champ

à l'intensité lumineuse; pour l'architecture et la reproduction des plans, on recherche la finesse, la rectitude des lignes, la planimétrie de l'image; pour le paysage, il faut obtenir la profondeur du foyer et l'étendue en surface. De là de nombreuses combinaisons optiques qui ne sont pas toujours réalisées avec succès par un seul fabricant. »

Nous avons dit à peu près tout ce qu'il y a d'essentiel, au point de vue scientifique, dans cette intéressante application aux arts du dessin de la physique et de la chimie. Néanmoins, il nous reste à mentionner une série de découvertes faites récemment dans le domaine de la photographie, et qui ont leur intérêt pour les physiciens et les hommes de l'art, pour les savants et les artistes. Nous joindrons à cette description succincte quelques détails sur les applications de la photographie elle-même aux sciences et aux arts.

§ 5. PHOTOGRAPHIE A LA LUMIÈRE ARTIFICIELLE.

Comme on vient de le voir, l'héliographie est fondée sur la propriété des rayons lumineux de modifier chimiquement les substances dites impressionnables ou sensibles; ce sont les radiations dites chimiques émanées de la lumière solaire directe ou de la lumière du jour, c'est-à-dire de la lumière solaire diffuse, qui jouissent des propriétés photogéniques. Mais d'autres lumières plus ou moins intenses ne peuvent-elles remplacer, au besoin, celle du Soleil? C'est une question que n'ont pas tardé de se poser et de résoudre les physiciens et les photographes.

La lumière électrique, par sa puissante intensité, devait la première attirer l'attention. On connaissait depuis longtemps son action colorante sur le chlorure d'argent, mise en évidence par Brande peu après la découverte de l'arc voltaïque par Davy. M. de la Rive constata plus tard qu'elle agissait sur les plaques daguerriennes, et ce savant obtint l'image d'un buste en plâtre

éclairé par la lumière éblouissante de l'électricité. L'application de cette source lumineuse à la photographie est entrée dans le domaine de la pratique, ainsi qu'il résulte de la note suivante que nous empruntons au journal *les Mondes*, d'octobre 1866 :

« M. Woodbury, de Manchester, continue à faire usage, pour la production de ses clichés photographiques sur gélatine, de la lumière électrique produite par la machine de M. Wild. Cette lumière, excitée entre les pointes de deux charbons, est entourée des négatifs, qu'elle doit traverser pour impressionner la gélatine, et l'on peut constater chaque jour que les reliefs sur gélatine obtenus avec la lumière électrique sont mieux définis que lorsqu'on opère à la lumière du Soleil ou du jour. » Cette note est relative, comme on voit, à un procédé de gravure héliographique dont nous dirons plus loin quelques mots ; mais la suite est relative à la production de véritables clichés photographiques : « MM. Saxon et Cie, aussi de Manchester, ne font plus leurs agrandissements qu'à la lumière électrique de M. Wild. En possession d'une lumière artificielle qui brille jour et nuit, ils ont pu prendre l'engagement d'agrandir en vingt-quatre heures les clichés négatifs qu'on leur confie. »

Toutefois l'emploi de cette lumière est coûteux. Dans les cas, assez rares d'ailleurs, où l'on peut avoir besoin de faire de la *photographie de nuit*, on préfère de beaucoup la lumière produite par la combustion du magnésium à celle de l'électricité. L'invention des lampes au magnésium, par sir David Brewster, le perfectionnement qu'un de nos savants compatriotes, M. Le Roux, y a apporté en associant le zinc au magnésium, ont permis d'appliquer cette lumière artificielle à la photographie. On a commencé par photographier des gravures, des bustes et des statues, et on a reconnu ainsi la valeur photogénique de la lumière du magnésium, d'ailleurs moins coûteuse que la lumière électrique.

On est arrivé par ce moyen à reproduire avantageusement les objets inanimés; mais, au point de vue artistique, l'effet est peu satisfaisant, à cause de l'opposition nécessairement exagérée

des lumières et des ombres : les portraits photographiques au magnésium ont une apparence pour ainsi dire cadavérique. En revanche, on a obtenu des images d'objets qui eussent échappé à l'art du photographe, par exemple l'intérieur d'une des pyramides d'Égypte, celui des célèbres cavernes du Kentucky connues sous le nom de *Mammoth-caves* (cavernes de Mammouth) : les magnifiques stalactites de ces roches souterraines ont pu ainsi être reproduites avec la plus grande fidélité. Les souterrains curieux, comme les catacombes de Rome, celles de Paris, ont pu bénéficier aussi de ce mode d'éclairage et de ses propriétés photogéniques.

D'autres lumières artificielles ont été essayées pour la production des images photographiques et ont réussi dans des mesures diverses. Telles sont les lumières produites par la combustion d'un jet de gaz oxyhydrique projeté au chalumeau sur des fragments solides de matières réfractaires : chaux, magnésie, zircone, chrome, etc. M. Van Monckhoven a obtenu des épreuves agrandies sur collodion ou sur papier en un temps variant de une à trois minutes, en éclairant à l'aide de la lumière du chalumeau à gaz projetée sur un mélange d'acide titanique, de magnésie et de carbonate de magnésie. Ce n'est pas tant d'ailleurs l'intensité lumineuse de la source qui est favorable à la reproduction, que la quantité des rayons chimiques émis par elle.

§ 6. ÉPREUVES AMPLIFIÉES. — PHOTOGRAPHIE MICROSCOPIQUE.

On comprend qu'en projetant à l'aide d'un microscope solaire l'image d'une épreuve photographique sur un écran sensibilisé, l'image agrandie de tous les détails de l'épreuve primitive viendra se former sur l'écran. Si l'on a opéré à l'aide d'un négatif, on obtiendra une épreuve positive ; mais on peut aussi obtenir un cliché négatif amplifié lui-même, et de là tirer autant d'épreuves positives qu'on voudra par la méthode ordi-

naire. Ce dernier procédé est beaucoup plus expéditif. Voici en quoi il consiste.

On tire d'abord, avec le cliché négatif obtenu à la chambre noire, un cliché positif de mêmes dimensions. C'est ce dernier qu'on soumet à l'amplification du microscope solaire, de sorte que l'épreuve amplifiée se trouve être elle-même une épreuve négative. Il est bien clair que cette épreuve est reçue sur une glace collodionnée qu'on a rendue sensible par les procédés connus. Une fois révélée et fixée, l'épreuve négative agrandie aux dimensions voulues sert au tirage des épreuves positives. De cette façon l'appareil optique d'agrandissement n'est employé qu'une fois, ce qui explique la plus grande rapidité de cette méthode.

La difficulté, dans l'agrandissement des épreuves photographiques, consiste à obtenir rapidement des épreuves très nettes, non déformées et conservant la vigueur de tons des épreuves obtenues à la chambre noire. A l'origine, les photographies amplifiées laissaient beaucoup à désirer sous tous ces rapports ; mais, à force de recherches, on est arrivé à une perfection remarquable. A l'Exposition universelle de 1867, on a pu admirer un magnifique portrait en pied de M. Ingres, et une vue agrandie de la cathédrale d'Amiens, qui, composée seulement de quatre morceaux, ne mesurait pas moins de 2 mètres de largeur sur $2^{m},50$ de hauteur. Appliquée à l'astronomie, nous verrons que cette méthode d'agrandissement a donné, entre les mains d'opérateurs savants et habiles, des résultats déjà remarquables.

On comprend l'importance de ce procédé, non pas tant pour les vues ordinaires, pour les portraits, mais pour la reproduction des objets dont les détails multipliés échappent au crayon du dessinateur le plus habile et le plus patient. Le vœu qu'Arago formait dans son rapport sur l'invention de Daguerre, de voir obtenir les images fidèles des milliers d'hiéroglyphes dont sont recouverts les monuments de l'antique Égypte, ce vœu est réalisé aujourd'hui, grâce au procédé d'agrandissement des épreuves photographiques.

Si l'image, de quelques centimètres de diamètre, d'un astre comme la Lune, peut se transformer ainsi en une épreuve de 1 mètre et plus, et permet d'étudier à loisir la configuration orographique de notre satellite, combien la méthode d'agrandissement n'est-elle pas plus précieuse encore en fixant les milliers d'images des objets naturels qui, par leur petitesse, échappent à la vue! Pour obtenir ce résultat, il fallait pouvoir produire des épreuves nettes de ces infiniment petits. C'est un progrès qui a été pareillement réalisé et d'où est résultée toute une branche nouvelle de l'art inventé par Niepce et Daguerre : la *photographie microscopique*.

C'est encore à un de nos compatriotes, M. Bersch, qu'est dû en grande partie ce nouveau pas : les instruments optiques nécessaires à la production des images microscopiques, à leur amplification ultérieure, les dispositions à prendre pour les diverses opérations que cette production exige, ont été inventés par ce savant. D'autres ont contribué à perfectionner ces procédés et à obtenir des épreuves d'une grande perfection : citons, parmi eux, M. Neyt (de Bruxelles), MM. Dagron, Moitessier, Lackerbauer, J. Girard, en France. Tout le monde connaît ces merveilleuses et imperceptibles photographies, grosses comme une tête d'épingle, qui, enchâssées dans le chaton d'une bague, dans un bijou quelconque, se voient à la loupe avec les dimensions des épreuves ordinaires : portraits, vues, monuments, etc. Adaptés au genre de loupe que nous avons décrit (p. 496) sous le nom de *loupe Stanhope*, ces petits objets portent avec eux-mêmes le microscope qui permet de les voir agrandis et dans tous leurs détails. Un point à peine perceptible à l'œil nu y devient une page entière d'un livre qu'on peut lire avec la même facilité que sur l'original. C'est à M. Dagron qu'on doit cette charmante invention.

Ce n'est là toutefois qu'un objet de pure curiosité, de fantaisie ; mais la photographie microscopique ne s'est point bornée à ces miniatures dont l'utilité est fort contestable. Elle s'est appliquée à des reproductions utiles, et elle a trouvé un ample

domaine dans la micrographie zoologique et végétale. « La photomicrographie, dit M. J. Girard, est une méthode iconographique admirable, grâce à laquelle le savant conserve le témoignage indéniable de ses découvertes, et qui reproduit sans les dénaturer les merveilles de délicatesse des charmantes compositions de la nature. Elle est fort intéressante, alliant l'art fascinateur de la photographie avec le plus attrayant des instruments d'optique. Avec un microscope ordinaire et des appareils de photographie élémentaires, on arrive à fixer des images microscopiques ; pour les travaux de micrographie supérieure, un plus grand luxe d'installation devient nécessaire. La disposition la plus simple consiste à adapter le microscope au bout d'une chambre noire dont on supprime l'objectif, en mettant à la place un raccordement en caoutchouc (fig. 342). Le tout se place sur une table près d'une fenêtre exposée aux rayons du Soleil. Au moyen du miroir, on éclaire vivement l'instrument et l'image du sujet va se projeter sur l'image dépolie de la chambre noire. Les opérations photographiques sont identiquement semblables à celles que l'on pratique ordinairement. » (*Les Plantes étudiées au microscope.*)

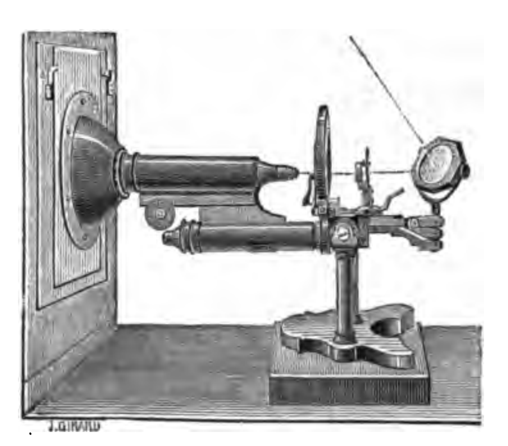


Fig. 342. — Microscope adapté à la chambre noire pour la micrographie.

En présentant à l'Académie des sciences des épreuves microscopiques de diatomées obtenues avec des grossissements variables, M. Girard s'exprimait ainsi sur les moyens employés par lui : « Ces moyens, dit-il, sont identiques à ceux de la photographie ordinaire, avec cette seule différence que l'objectif à reproduction est remplacé par un autre très petit, éclairé par la lumière solaire réfléchie au moyen d'un miroir plan ou con-

cave, suivant les circonstances. Pour donner à cette lumière les qualités photogéniques nécessaires, il est indispensable de la corriger par l'interposition d'un verre d'une nuance bleuâtre. Quand elle manque d'intensité, comme quand on fait usage d'objectifs forts dont la lentille frontale a à peine 1 millimètre de diamètre, il est nécessaire d'avoir recours à un condensateur.

« La photomicrographie, ajoute ce savant, est un moyen parfaitement exact pour la résolution des *tests* les plus difficiles ; l'image obtenue édifie d'une manière irréfutable sur la valeur du système optique du microscope. Elle permet, au surplus, de constater les différents effets de lumière insaisissables autrement ; l'interférence et la diffraction se traduisent souvent sur quelques diatomées par des combinaisons remarquables. » (*Comptes rendus*, 1869.)



Fig. 343. — Études de photomicrographie végétale. Coupe diamétrale d'une tige de *Canna indica*, d'après M. J. Girard.

Le même auteur a fait une autre application non moins intéressante de la photographie microscopique en étudiant, à l'aide de la lumière polarisée, les cristaux de certains sels.

En médecine, en physiologie, cette branche de l'art photographique rend des services non moins précieux. M. le docteur Ozanam a imaginé un appareil qui enregistre photographiquement les battements du pouls avec toutes ses phases : il obtient ainsi une ligne ondulée qui, agrandie, montre toutes les variations qui peuvent se produire dans les pulsations pendant le court intervalle de la cent-millième partie d'une seconde.

En résumé, les innombrables découvertes que le microscope a fait faire dans le domaine des sciences naturelles, la pho-

tomicrographie les fixe et permet, par l'agrandissement des épreuves, de les étudier d'une façon permanente.

Pendant le siège de Paris par les Allemands, cette application de la physique a rendu des services d'un autre genre. Elle a permis de réduire à une surface de quelques centimètres carrés les plus longues et les plus volumineuses dépêches que les pigeons emportaient sous leur aile, de la province à Paris. L'organisation de cette poste microscopique fut d'abord commencée à Tours sous la direction d'un photographe de cette ville, M. Blaise. C'était d'abord sur papier que se faisaient les épreuves ainsi réduites : sur chaque côté de la feuille, on pouvait reproduire deux pages d'imprimerie ; mais le grain du papier limitait la finesse du texte, et, de plus, le temps de pose (en hiver) était considérable. Aussi le système que M. Dagron, envoyé de Paris à Tours par ballon, proposa à la Délégation nationale fut-il préféré (fin novembre 1870). Ce photographe opérait sur de minces pellicules de collodion très légères et assez sensibles pour n'exiger que deux secondes de pose, au lieu de deux heures. Voici, à ce sujet, quelques détails tirés d'une brochure publiée par M. Dagron :



Fig. 344. — Études de photomicrographie végétale, par M. J. Girard. Une diatomée.



627 642

Fig. 345. — Photographie microscopique. Fac-simile d'une dépêche expédiée à Paris pendant le siège.

« Chaque pellicule était la reproduction de douze ou seize pages in-folio d'imprimerie, contenant en moyenne, suivant le type employé, trois mille dépêches. La légèreté de ces pellicules a permis

à l'administration d'en mettre sur un seul pigeon jusqu'à dix-huit exemplaires, donnant un total de plus de cinquante mille dépêches pesant ensemble *moins d'un demi-gramme*. Toute la série des dépêches officielles et privées que nous avons faites pendant l'investissement de Paris, au nombre d'environ cent quinze mille, pesait *en tout un gramme*. Un seul pigeon eût pu aisément les porter. Si l'on veut maintenant multiplier le nombre des dépêches par le nombre d'exemplaires

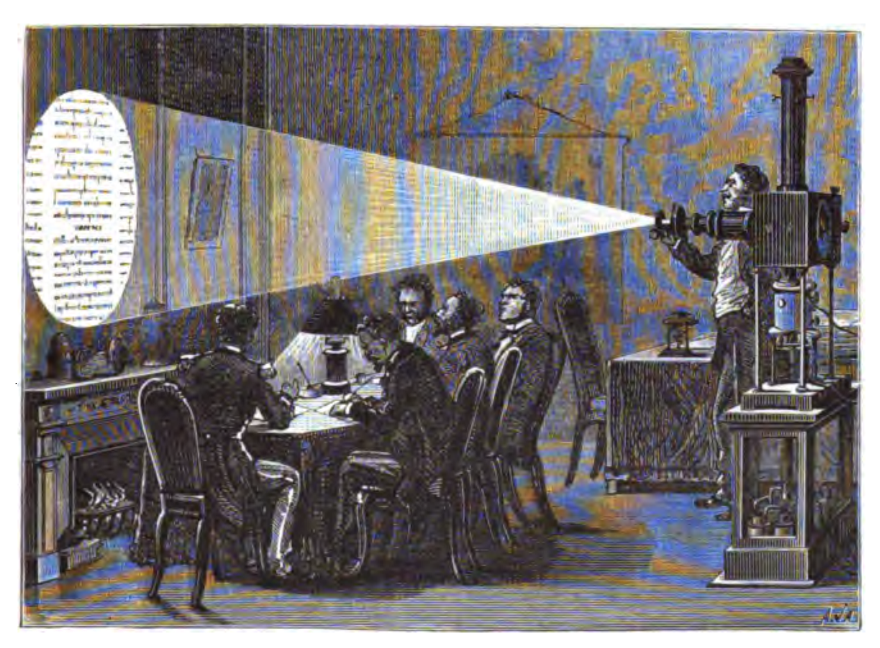


Fig. 346. — Agrandissement et lecture des dépêches microscopiques pendant le siège de Paris.

fournis, on trouve un résultat de plus de deux millions cinq cent mille dépêches que nous avons faites pendant les deux plus mauvais mois de l'année.

« On roulait les pellicules dans un tuyau de plume que des agents de l'administration attachaient à la queue du pigeon. Leur extrême souplesse et leur complète imperméabilité les rendaient tout à fait convenables à cet usage. En outre, ma préparation sèche a le triple avantage d'être apprêtée en une seule fois, de ne donner aucune bulle, et de ne pas se détacher

du verre à la venue de l'image ; elle donne toute sécurité dans le travail, et n'expose pas aux déboires comme les procédés ordinaires. » Arrivées à Paris, les dépêches microscopiques étaient soumises à l'agrandissement et projetées par un microscope solaire qu'éclairait la lumière électrique sur un écran blanc. Là, on pouvait prendre copie de leur contenu. La transparence des pellicules collodionnées rendait cette projection facile et la lecture du texte se faisait aisément.

C'est assurément là une des plus ingénieuses et des plus utiles applications que la science physique et l'art de la photographie aient pu rendre, trop tard malheureusement pour l'intérêt suprême de la défense nationale.

§ 7. PHOTOGRAPHIES INSTANTANÉES.

La rapidité de l'impression photographique, ou la faible durée du temps de pose, est, dans un grand nombre de circonstances, une des conditions du succès pour le photographe. On a vu que du temps de Daguerre la plaque sensible devait rester quinze minutes au moins soumise dans la chambre noire à l'action de la lumière : aussi les portraits étaient-ils alors impossibles; la reproduction des paysages, des arbres, de tous les objets en un mot dont certaines parties sont en mouvement et dont l'éclairage varie, ne donnait que des épreuves imparfaites. Grâce au perfectionnement des procédés, des appareils d'optique et surtout à la découverte de substances impressionnables d'une grande sensibilité, ces difficultés ont été peu à peu surmontées et vaincues.

Toutefois la faible durée de la pose dépend encore de certaines conditions qui ne sont pas toujours rassemblées : il faut que les objets à reproduire soient éclairés par la lumière la plus vive possible; et le photographe doit se servir d'un objectif à large ouverture, à mouvement rapide; enfin, la surface exposée à l'action lumineuse doit être de la plus grande sensibilité.

Ces conditions remplies, on arrive maintenant à des résultats qui, sous le rapport de la rapidité de l'impression, paraissent merveilleuses, et ont fait donner aux épreuves obtenues le nom de *photographies instantanées*.

Les photographies de la surface du Soleil, qui ont permis la reproduction de certains accidents de la photosphère, comme les taches, avec tous les détails de la structure du noyau et des pénombres, les facules et enfin les pores ou rides, méritent les premières d'être classées dans cette catégorie. Seulement on peut dire que, pour les obtenir, l'excessive rapidité de la pose était nécessitée par l'excessive intensité de la lumière. « La durée de l'exposition doit être tellement courte, dit le P. Secchi, qu'il faut pour la régler employer un appareil spécial. Il consiste en une plaque métallique glissant dans une rainure, et portant une fente très étroite dont on peut faire varier la largeur à volonté. Au moment de l'opération, on lâche une détente ; la plaque obéit à l'action d'un ressort, et la fente passe rapidement à travers le cône lumineux. » Toutefois les astronomes les plus habiles, les Warren de la Rue, les Rutherford, n'avaient réussi à photographier que les accidents les plus aisément visibles de la surface du Soleil, les taches, les facules. Quant à la surface photosphérique, elle n'offrait dans leurs épreuves que des marbrures, sans indiquer les détails si délicats de la structure en granulations, ou grains de riz, que certains observateurs avaient aperçus au télescope. C'est M. Janssen qui est parvenu le premier à reproduire ces détails par la photographie. Voici, d'après lui, les principales conditions nécessaires à cette reproduction :

« L'infériorité des images photographiques solaires obtenues jusqu'ici, dit-il, tenait uniquement aux conditions défavorables dans lesquelles elles étaient obtenues. En premier lieu, il faut placer les circonstances de durée exagérée dans l'action lumineuse. En effet, quand l'action lumineuse est trop prolongée relativement à son intensité, l'image photographique s'agrandit rapidement et perd toute netteté de contours. Ce phé-

nomène, qu'on pourrait nommer l'*irradiation photographique* (sans rien préjuger sur sa cause), est très frappant dans les photographies d'éclipses totales qui ont été obtenues depuis 1860[1]. Sur ces photographies, on voit l'image des protubérances empiéter sur le disque lunaire d'une quantité qui s'élève à 10, 15 secondes et plus. On comprend que, quand il s'agit de granulations solaires qui ont un diamètre moyen de 2 à 3 secondes, on ne peut les obtenir sur des images où l'irradiation photographique aurait une valeur supérieure à leurs propres dimensions. J'ai donc étudié avec le plus grand soin le temps de l'action lumineuse, de manière à combattre cet obstacle principal...

« Le temps de l'action lumineuse, qui est la condition exclusive du succès, a été abaissé jusqu'à $\frac{1}{3000}$ de seconde en été. Il faut un mécanisme tout spécial et très parfait pour régler ainsi une durée aussi courte et donner, pour les diverses parties de l'image, une égalité d'action lumineuse qui doit être réalisée à $\frac{1}{10\,000}$ de seconde. Quand la durée d'action lumineuse est si courte, l'image est beaucoup plus latente encore que dans les circonstances ordinaires ; il faut lui appliquer un développement lent, qui se termine ensuite par le renforcement à l'acide pyrogallique et au nitrate d'argent. Je n'ai pas besoin d'ajouter que les opérations photographiques doivent être conduites avec le plus grand soin quand il s'agit d'images destinées à révéler de si délicats détails. En particulier, disons que le coton-poudre doit être préparé à haute température pour donner une couche d'une finesse suffisante. Ces conditions réalisées, on obtient alors des images solaires qui, par rapport aux anciennes, constituent un monde nouveau... »

Dans un ordre tout différent de recherches, on est parvenu dans ces derniers temps à réduire assez le temps de pose, ou mieux la durée de l'impression, pour que l'objectif du photographe puisse saisir l'image d'objets mobiles, d'animaux en

1. Nous avons mentionné le phénomène dans le § 2 du chapitre XVI. Voir page 108 et figure 226.

mouvement, de trains de chemin de fer en marche. Citons quelques exemples.

Dans une conférence faite en mars 1881 à la Sorbonne, M. Davanne rapportait les faits suivants :

« Un amateur fort habile, M. Hieckel, dit-il, a bien voulu faire les essais pour saisir au passage un train de chemin de fer. Lorsqu'il s'agit d'un service de banlieue, à vitesse ralentie, traversant le pont d'Asnières, marchant environ à 16 kil. à l'heure, on obtient une épreuve qui présente, sinon la netteté complète, du moins un ensemble très reconnaissable. Dans ces conditions, le train glisse et se déplace d'environ 4 mètres à 5 mètres par seconde, soit 0,05 pour $\frac{1}{100}$ de seconde ; il n'est donc pas étonnant qu'on n'arrive pas à la netteté parfaite. Je ne saurais vous dire quel a été le temps de pose des épreuves que vous venez de voir, mais à coup sûr, d'après l'aspect du cliché, il a été trop long ; on eût pu le diminuer de moitié, et si avec un objectif à plus large diaphragme on eût concentré l'effet lumineux sur le train seul, la pose pouvait encore être réduite dans une proportion considérable. Alors, dans ces conditions spéciales d'un train bien éclairé, se profilant sur le ciel, on pouvait arriver à un ensemble suffisamment net.

« Un autre essai a été tenté sur le train express de Rouen, faisant, je crois, 60 kilomètres à l'heure, soit $16^m,60$ à la seconde ; nous n'avons plus qu'une bande marquée sur le pont ; on distingue encore les espaces des wagons. Toutefois l'aspect général donne le sentiment d'une extrême rapidité, qu'on sentirait moins avec une épreuve plus nette. »

M. Davanne cite encore d'autres essais intéressants, la reproduction d'une mer agitée, celle d'une jeune fille sautant à la corde. Il rapporte, mais sur simple ouï-dire, qu'en Angleterre un opérateur aurait pu saisir chaque goutte d'eau de la gerbe d'un arrosoir, un autre l'image d'une hirondelle au vol. D'après le journal *Enginneering*, un photographe d'Henley-on-Thames, près de Londres, aurait photographié la locomotive de l'express de Flijing Dutchman, sur la ligne de Great Western, à

la station de Tivyford, alors qu'elle marchait à l'énorme vitesse de 96 kilomètres à l'heure. La machine a été reproduite dans tous ses détails avec autant de précision que les objets immobiles environnants. La durée de l'exposition était de $\frac{1}{500}$ de seconde.

Des études fort intéressantes ont été entreprises par deux Américains, MM. Stanford et Muybridge. Dans le but de contribuer à résoudre le problème de la locomotion des animaux, problème que notre savant compatriote M. le docteur Marey a abordé si heureusement par la méthode d'enregistrement graphique, M. Stanford songea à utiliser la photographie, et pour cela s'adressa à M. Muybridge. « M. Stanford, dit celui-ci, me consulta à ce propos et je résolus de le seconder dans sa tâche. Il me chargea de poursuivre une série d'expériences plus complète. A cet effet, nous avons construit trente chambres noires à obturateur électrique qui, pour la photographie des chevaux, seront placées à environ 12 pouces les unes des autres. Nous nous proposons de fixer toutes les attitudes imaginables d'athlètes, de chevaux, de bœufs, de chiens et d'autres animaux à l'état de mouvement. »

Les mêmes expérimentateurs se proposent de reproduire aussi, s'il est possible, les oiseaux dans leur vol, bien qu'ils craignent de rencontrer de ce côté des difficultés plus grandes qu'avec les autres animaux. En attendant, les résultats qu'ils ont obtenus dans la fixation des mouvements et des allures du cheval sont extrêmement remarquables. Ils ont photographié cet animal au pas, au petit et au grand trot, au galop, en voiture. Les épreuves photographiques de M. Muybrige montrent un cheval conduisant un tilbury au trot avec une vitesse de 715 mètres à la minute, et les allures du cheval galopant avec la vitesse considérable de 1142 mètres à la minute. Les allures successives obtenues sont celles de l'animal à des intervalles excessivement courts de $\frac{1}{20}$ de seconde pour la première allure et de $\frac{1}{34}$ de seconde pour la deuxième.

CHAPITRE VIII

HÉLIOGRAVURE — PHOTOLITHOGRAPHIE

§ 1. IMPRESSION AUX SELS D'OR ET D'ARGENT, A LA GÉLATINE BICHROMATÉE.

Depuis l'invention de la photographie, tous les efforts des chercheurs se sont tournés vers la solution de ce double problème : obtenir des épreuves positives inaltérables; multiplier le nombre des épreuves. Le cliché ou négatif obtenu, c'est en effet l'impression qui est le but à atteindre. Il en est de la phographie à cet égard comme des autres méthodes de reproduction, gravure, lithographie, typographie.

Nous avons décrit précédemment le procédé d'impression des épreuves positives par les sels d'or et d'argent[1], ainsi que les moyens à employer pour le fixage. Ce procédé, outre qu'il est coûteux, a un inconvénient grave, l'altérabilité des épreuves obtenues ; mais comme ces épreuves sont les plus belles, les plus séduisantes à l'œil, elles sont toujours recherchées. A la

1. L'agent de ce mode d'impression est la lumière, dont les radiations, comme nous l'avons déjà dit, exerçant sur certaines substances des actions réductrices et oxydantes, sont le principe même de la photochimie ou, ce qui revient au même quand on considère les applications de cette branche de la physique, le principe de la photographie. Complétons ce qui a déjà été dit à ce sujet.

La lumière a la propriété de décomposer ou de réduire en leurs éléments certains sels, tels que l'azotate d'argent, les chlorures, bromures et iodures des métaux les moins oxydables, d'argent, d'or, de mercure, platine etc. Voilà pour les actions réductrices. Maintenant l'oxygène et les corps halogènes, iode, brome, etc., qui tendent à abandonner les métaux dont les composés sont exposés à la lumière, ont dans les mêmes circonstances une tendance à se porter sur certaines matières organiques et à se combiner avec elles : il y a oxydation. Les effets de ces deux modes d'action étant superposés, c'est-à-dire les matières organiques

vérité de grands progrès ont été faits, sous le rapport de leur conservation, de sorte qu'aujourd'hui le tirage au chlorure d'argent fait dans de bonnes conditions donne des images qui durent aisément quinze ou vingt ans. Or, il y a seulement quinze ans, les épreuves obtenues par ce procédé supportaient avec peine six mois d'exposition à la lumière.

Il est un autre mode d'impression par l'action de la lumière, qui, s'il n'a pas encore atteint le même degré de perfection que le procédé aux chlorures d'or ou d'argent, a du moins le mérite d'une durée à peu près indéfinie. C'est le procédé dit *au charbon*, découvert en 1852 par M. A. Poitevin. Il est basé sur une propriété remarquable de la gélatine (ou de tout autre corps mucilagineux, albumine, fibrine, gomme arabique) lorsqu'elle est additionnée d'un bichromate alcalin ou terreux, par exemple de bichromate de potasse. Le mélange à volumes égaux d'une solution concentrée de gélatine et d'une solution concentrée de bichromate devient insoluble, même dans l'eau chaude, si elle est exposée à la lumière. Si donc on fait un mélange intime des éléments dont nous parlons avec des substances colorantes insolubles, telles que le charbon, qu'on en recouvre uniformément une feuille de papier, et qu'après dessiccation on place la feuille derrière un cliché négatif en l'exposant à la lumière, voici ce qui se produit. Toutes les parties de la surface qui ont reçu l'action lumineuse directe ou diffuse sont devenues insolubles. Dès lors, si l'on soumet le papier à un lavage à l'eau tiède, toutes les parties de la gélatine non insolées se dissolvent, et la couleur ne reste sur le papier que dans les parties im-

imprégnées des substances salines en question se trouvant soumises à la lumière, l'influence de celle-ci se trouve par la même activée. Mais il n'est pas nécessaire que les deux éléments du mélange se trouvent simultanément exposés à la lumière : il suffit que l'un d'eux en reçoive l'effet; l'image est produite, mais elle n'est révélée que lorsqu'on fait intervenir le second élément. Alors l'épreuve négative apparait. Quant à l'obtention de l'épreuve positive, il est clair qu'elle est due précisément au même mode d'action de la lumière.

Ajoutons une remarque intéressante, c'est qu'il y a généralement réciprocité entre les substances impressionnables et les substances révélatrices. Par exemple, si l'on soumet d'abord à la lumière un papier imprégné d'azotate d'argent, l'image est révélée par l'acide gallique ou le sulfate de fer. Mais si au contraire on expose au soleil un papier imprégné d'acide gallique, l'azotate d'argent servira ensuite de substance révélatrice.



SPECIMEN D'HÉLIOGRAVURE

pressionnées, proportionnellement à l'intensité de la lumière qui a traversé le cliché. On obtient ainsi une image constituée par une couleur inaltérable.

Le procédé au charbon a les mêmes avantages que ceux du tirage des épreuves d'une gravure, tirage qui se fait par les moyens d'impression à l'encre d'imprimerie. La solidité des épreuves tient à l'emploi du mélange de gélatine où le charbon (noir de fumée) entre comme matière colorante. Mais, en réalité, c'est sur la propriété qu'ont certaines substances organiques (albumine, gomme, gélatine) imprégnées de bichromates alcalins, d'être impressionnées par la lumière et de devenir insolubles, qu'est basé tout le procédé. Nou en verrons bientôt d'autres applications importantes.

L'invention due à M. Poitevin n'eut pas tout d'abord le succès qu'il en attendait : les parties de l'image les plus vigoureuses venaient seules, les demi-teintes étaient emportées, parce que, comme le reconnut M. Laborde, la couche impressionnée a une faible épaisseur, et que la couche de gélatine sous-jacente se dissolvait dans l'eau et emportait avec elle les parties les plus légères de l'image. Un photographe français, M. Fargier, trouva le moyen de remédier à cet inconvénient en développant l'épreuve du côté de la gélatine opposé à la face impressionnée. Du reste, le procédé Poitevin a reçu diverses améliorations, soit de l'auteur lui-même, soit d'autres opérateurs et inventeurs.

Tel est le procédé imaginé par M. A. Poitevin. Il a été l'objet de perfectionnements nombreux qui l'ont fait entrer dans la pratique courante de la photographie. « Les tirages dits au charbon, qui donnent des résultats supérieurs pour les reproductions artistiques, plaisent généralement moins pour les portraits. Si on les met en parallèle avec les épreuves faites à l'argent, ils semblent plus lourds et n'ont pas encore conquis la faveur du public. » M. Davanne, en constatant ces résultats dans son *Rapport sur les épreuves de photographie à l'Exposition universelle de* 1878, ajoute que l'impression photographique au charbon prend une importance de plus en plus grande. Il cite en tête

de ce progrès la Belgique, puis la Suisse, et il ajoute : « Mais c'est surtout en France que ce mode d'impression peut être étudié dans ses différentes applications, parmi lesquelles il faut citer en première ligne les reproductions d'œuvres artistiques. La facilité avec laquelle on peut adapter au sujet les substances colorantes diverses le rend supérieur à tout autre pour le fac-simile... Ajoutons que, par le fait même des opérations et des transports qui sont la conséquence de ce procédé, on peut employer les papiers les plus variés ou ajouter des teintes plates sous-jacentes, auxquelles la photographie donne le modelé nécessaire, et l'on obtient ainsi pour les portraits de légères colorations, qui viennent modifier ce que les teintes monochromes ont de trop triste dans les agrandissements. »

Dans les procédés d'impression par les sels d'or et d'argent, comme dans le procédé au charbon que nous venons de décrire, c'est toujours l'action directe de la lumière qui détermine la production des épreuves, dont le nombre se trouve limité en raison du prix de revient relativement considérable. Il nous reste à parler des impressions mécaniques, où la lumière, bien que nécessaire encore, n'intervient plus que d'une manière transitoire, pour passer du cliché négatif à la planche d'impression. Une fois celle-ci obtenue, on peut tirer mécaniquement autant d'épreuves qu'on veut.

Les procédés d'impression mécanique, qui sont tous dérivés de la découverte d'A. Poitevin sur les propriétés de la gélatine bichromatée, se divisent en plusieurs modes, connus sous les noms de *photolithographie*, d'*héliogravure* ou de *photogravure*, de *photoglyptie* et enfin de *phototypographie*. Nous allons passer rapidement en revue chacun de ces procédés.

§ 2. HÉLIOGRAVURE ET PHOTOLITHOGRAPHIE ; PREMIERS ESSAIS.

Nous venons de voir que, quelque procédé qu'on emploie pour le fixage des épreuves daguerriennes ou photographiques, elles n'ont point la solidité que donne l'impression ordinaire, qui se fait avec des encres grasses à peu près indestructibles; de plus, le nombre des épreuves est nécessairement limité, parce qu'il faut faire intervenir la lumière dans la production de chacune d'elles, et qu'ainsi le prix de revient reste fort élevé.

Le tirage au charbon par le procédé Poitevin résout bien la première de ces difficultés; il lui reste toujours une infériorité sur le tirage typographique et lithographique des gravures, celle de la cherté relative et de la longueur des opérations.

Il n'est donc pas étonnant qu'on ait cherché, dès l'origine, à faire disparaître cette infériorité, en transformant le cliché photographique en une véritable planche de gravure en relief ou en taille-douce, ou de lithographie. C'est ce problème que poursuivit Niepce dès ses premiers travaux, et que nombre de savants ou d'artistes ont cherché à résoudre depuis. Disons un mot des résultats auxquels ils sont parvenus et des principales méthodes qu'ils ont inventées.

Dès 1841, M. Fizeau cherchait à reproduire par la galvanoplastie les images des plaques de Daguerre : le cuivre déposé par la pile se moulait sur la surface, dont il reproduisait en creux les reliefs, c'est-à-dire tous les points où se trouvaient disséminées les gouttelettes de mercure formant les clairs ou les lumières. En se servant de ce moule pour obtenir un cliché inverse, on reproduisait la plaque elle-même, qu'il ne s'agissait plus que d'imprimer par les procédés ordinaires de l'impression des gravures. Malheureusement, les reliefs et les creux étaient si peu accusés, qu'on ne reproduisait ainsi que des images confuses.

On a cherché alors (MM. Berres, Donné) à obtenir des plan-

ches en faisant attaquer à l'eau-forte les plaques daguerriennes. M. Grove a associé les deux méthodes précédentes en faisant attaquer la plaque par un des éléments d'une combinaison voltaïque qui agit inégalement sur les deux métaux, l'argent et le mercure.

Enfin, M. Fizeau imagina un procédé qui transformait les plaques daguerriennes en planches de gravure en taille-douce. Il faisait attaquer à chaud l'image par un acide mixte composé avec les acides nitrique, nitreux et chlorhydrique : les parties blanches restaient intactes ; les noires étaient attaquées et il se formait un chlorure d'argent adhérent dont la couche insoluble arrêtait l'action de l'acide. On enlevait cette couche avec une dissolution d'ammoniaque, et l'action de l'acide continuait à creuser la planche. Enfin, pour obtenir plus de profondeur, M. Fizeau dorait les parties saillantes, qui se trouvaient ainsi mises à l'abri d'une action ultérieure de l'acide nitrique. L'argent étant un métal peu dur et ne permettant dès lors qu'un tirage limité, la planche était cuivrée par les procédés galvaniques (aujourd'hui, on acière les planches de cuivre).

C'étaient là certainement des essais remarquables; mais, comme bientôt la photographie sur papier et sur verre collodionné ou albuminé se substitua au procédé primitif de Daguerre, les tentatives de gravure des plaques daguerriennes furent abandonnées.

Vers 1853, M. Niepce de Saint-Victor obtint des gravures sur acier de la façon suivante : Il recouvrait la planche à graver d'une couche d'un vernis impressionnable formé de bitume de Judée, de benzine, de cire et d'éther sulfurique additionné de quelques gouttes de lavande. Il appliquait sur la plaque sèche un cliché positif sur papier ou sur verre et exposait à la lumière, comme pour obtenir une épreuve. Enfin, la plaque impressionnée étant passée à l'huile de naphte mélangée de benzine, était attaquée par un mélange d'acide nitrique étendu et d'alcool. La gravure était achevée à l'eau-forte.

§ 3. — PHOTOLITHOGRAPHIE ; PROCÉDÉ DE M. POITEVIN.

Parmi les méthodes nombreuses inventées depuis pour le tirage mécanique des épreuves photographiques à l'encre grasse, il faut citer en première ligne celle que M. Poitevin a tirée de la propriété de la gélatine bichromatée dont nous venons de parler plus haut. Voici les termes mêmes dans lesquels M. Poitevin décrit cette méthode :

« Pour reproduire à l'encre grasse sur papier, pierre lithographique, surface métallique ou bois la contre-épreuve d'un dessin photographique, on applique sur la surface qui doit recevoir le dessin une ou plusieurs couches d'un mélange à volumes égaux d'une solution concentrée d'albumine, fibrine, gomme arabique ou succédanés et d'une solution concentrée d'un chromate ou bichromate à base alcaline terreuse ou métallique, ne précipitant pas la matière organique de sa dissolution. Ordinairement on emploie le bichromate de potasse ; après dessiccation ou avant, si l'impression doit être faite à la chambre noire, on expose à la lumière, et, après l'insolation, on applique au tampon ou à la presse une couche uniforme d'encre grasse ou de couleur, on détache l'encre par lavage : l'encre ne reste que sur les parties impressionnées par la lumière. »

Pour obtenir des reliefs ou des creux par l'action seule de la lumière, sans employer les procédés de morsure aux acides ni le travail du burin, en un mot, pour produire des planches gravées par la lumière seule, soit typographiquement, soit en taille-douce, voici comment agissait le même inventeur. Il coulait sur une surface quelconque une couche uniforme d'une dissolution de gélatine imprégnée de bichromate de potasse. Après dessiccation, il recouvrait la plaque d'un cliché positif ou négatif obtenu par la photographie et soumettait le tout à l'action directe ou diffuse de la lumière. La même plaque pouvait être exposée au foyer de la chambre noire, dans le cas où l'on vou-

lait opérer d'après nature. « Après l'impression, on plonge dans l'eau la couche de gélatine; alors toutes celles de ses par-



Fig. 347. — Fac simile d'une gravure héliographique.

ties qui n'ont pas reçu l'impression lumineuse s'en imprègnent, la gélatine se gonfle et donne des reliefs, tandis que les parties

qui ont été impressionnées, s'humectant peu, forment les creux. Les reliefs correspondent donc aux noirs du dessin et les creux aux blancs. » Ainsi s'obtenait une planche gravée sur gélatine, qu'on transformait ensuite en planche sur cuivre par les procédés ordinaires de la galvanoplastie.

Parmi les procédés d'impression mécanique dérivés du procédé Poitevin, nous citerons notamment le procédé Asser, fondé sur la propriété du bichromate de potasse impressionné par la lumière d'accepter facilement et de retenir l'encre d'imprimerie dont on l'enduit, et sur celle du papier non collé d'être aisément humecté par l'eau dans toutes ses parties. Sous le nom de *photozincographie*, deux Anglais, le colonel James et le capitaine Scott, décrivirent un moyen « de produire des fac-simile photographiques d'un sujet tel qu'un manuscrit, une carte, une gravure au trait, et de la transporter ensuite sur zinc, de manière à pouvoir multiplier les épreuves de la même manière qu'un dessin sur pierre lithographique ou sur zinc. » Ce moyen était basé, comme le procédé Poitevin, sur les propriétés d'une solution de gomme bichromatée. C'est encore la méthode de Poitevin qui a inspiré à un habile photographe de Munich, M. Albert, un procédé qui donne surtout des résultats remarquables pour la reproduction des dessins au crayon. On peut avoir ainsi, pour les écoles de dessin, des fac-simile si fidèles des dessins des maîtres, qu'on confondrait l'original et les copies. On donne le nom d'*Albertypie* à cette méthode.

§ 4. PHOTOGRAVURE. — PHOTOTYPIE.

On comprend aujourd'hui sous le nom générique de *photogravure* (on dit aussi *héliogravure*, *héliographie*) tous les procédés d'impression mécanique ayant pour objet d'obtenir sur plaques métalliques, par l'action de la lumière, une gravure en creux de l'image d'un négatif photographique. Ces procédés

sont nombreux, mais on peut les ramener à l'une ou à l'autre des deux catégories suivantes :

La première consiste dans le moulage des reliefs que donne la photographie obtenue avec l'aide de la gélatine bichromatée; la seconde, dans la morsure au moyen des acides d'une planche



Fig. 348. — Le soldat de Marathon (gravure sur bois).

métallique sur laquelle la lumière a fixé les réserves formant le dessin. Quand il s'agit de reproduire un dessin, une gravure, une image quelconque formée par des traits ou des tailles, des lignes ou des points, l'un et l'autre de ces procédés de photogravure réussissent également bien. Mais où la difficulté commence, c'est quand on veut reproduire des demi-teintes dégra-

dées ou fondues, des ombres de diverses intensités dont l'effet n'est pas obtenu par des superpositions de traits, de grains, de hachures. Sont dans ce cas les objets naturels, et aussi les tableaux peints, c'est-à-dire les objets que les épreuves aux sels d'or et d'argent reproduisent, abstraction faite des couleurs, avec une perfection si grande.

On n'est parvenu à vaincre cette difficulté qu'en ajoutant au travail de la lumière, qu'en faisant intervenir certains tours de main dont les divers inventeurs n'ont pas toujours donné le secret. Ordinairement les opérateurs couvrent les teintes fondues, obtenues par la lumière, d'un grain convenable, proportionné à l'intensité. « L'héliogravure de M. Dujardin, dit M. Davanne, est obtenue au moyen d'une réserve et par la morsure directe de la planche dans les parties non réservées; un grain artificiel, habilement ajouté, donne les facilités nécessaires à l'impression. Ce mode de faire est à la fois peu coûteux et très expéditif, ce qui présente de grands avantages pour une foule de travaux. M. Rousselon, par une méthode qui lui est particulière, obtient immédiatement dans la gélatine un grain proportionné aux diverses teintes nécessaires pour la planche gravée; il moule cette gélatine par la photoglyptie (dont nous allons parler), puis par la galvanoplastie et produit ainsi une quantité considérable de planches gravées représentant surtout la reproduction des nombreux tableaux qui, chaque année, attirent plus particulièrement l'attention du public[1]. »

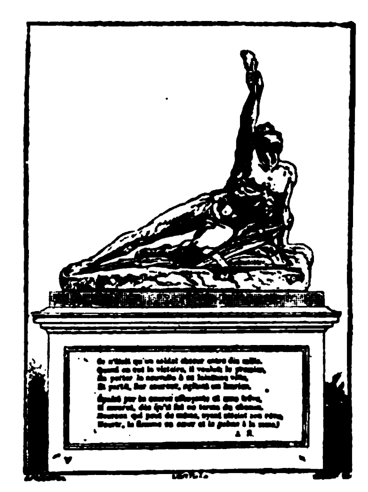


Fig. 349. — Réduction de la figure 348 par l'héliogravure.

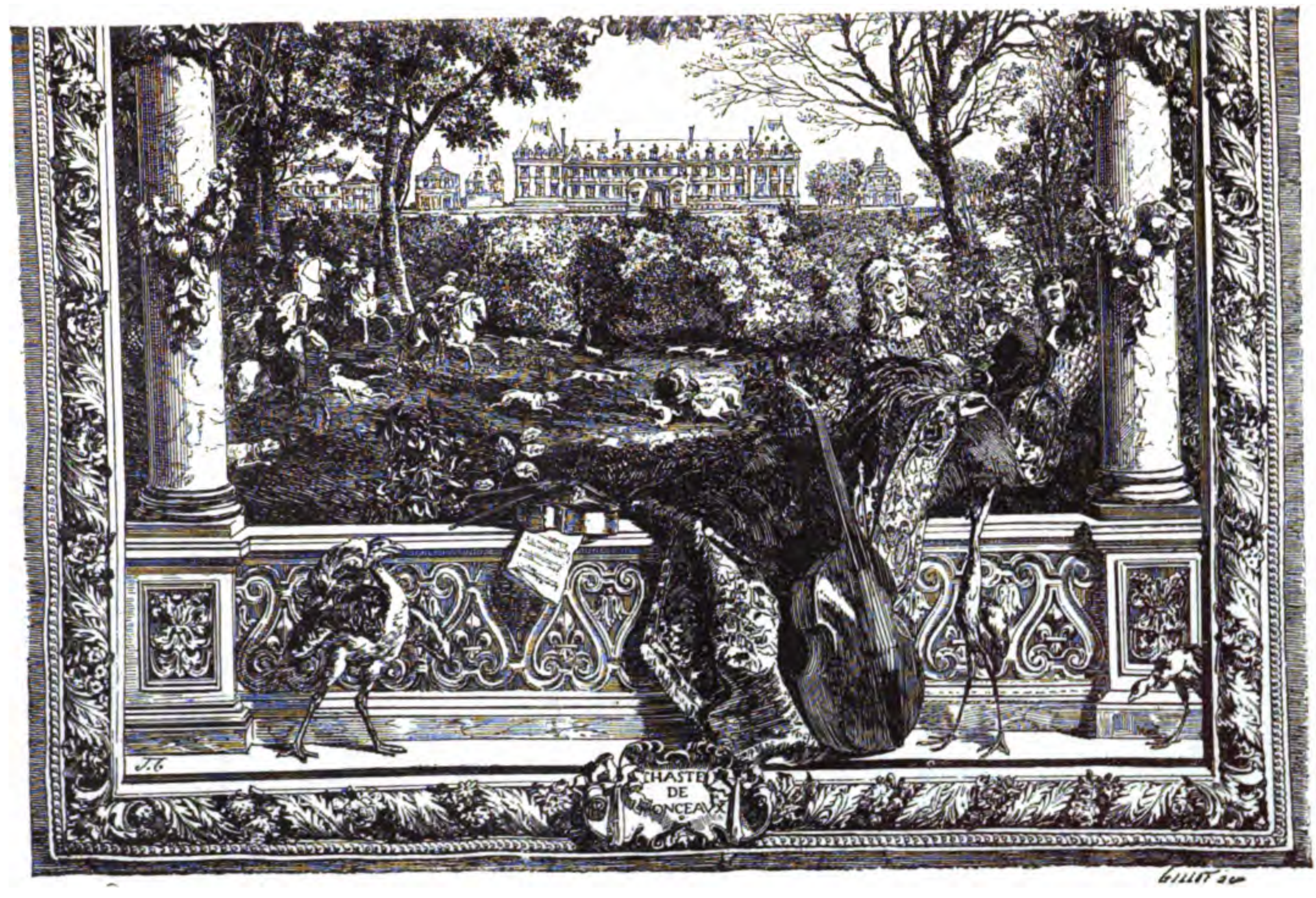
1. Il nous est impossible de donner ici une idée même sommaire des nombreux procédés de gravure héliographique, inventés dans ces dernières années : la plupart, du reste, peuvent être considérés comme dérivant du procédé Poitevin, étant basés presque tous sur l'impres-

La photogravure que nous venons de décrire sommairement ne peut s'appliquer qu'au tirage en taille-douce, non au tirage typographique, qui exige que les points ou traits à encrer soient en relief. Dès lors l'illustration dans le texte lui échappe.

Heureusement ce dernier mode d'impression photographique a été abordé, et les *procédés typophotographiques* sont entrés dans la pratique courante : mais jusqu'à présent l'application n'en a été faite qu'à la reproduction des gravures ou dessins au trait, ou présentant les points nécessaires à l'encrage. Un grand nombre des dessins de cet ouvrage ont été reproduits par le procédé de M. Gillot, que M. Davanne décrit sommairement en ces termes : « Pour obtenir par les acides un dessin en relief sur plaque de métal, il faut procéder par morsures répétées, en protégeant convenablement les parois déjà creusées. On y parvient en faisant descendre par une chaleur douce l'encre protectrice, de manière à l'étaler sur les parois sans boucher le fond. Cette méthode est due à M. Gillot. » Et il ajoute avec raison : « Tout en faisant la part d'une période de transition et de progrès à venir, nous croyons que le nouveau procédé, au point de vue artistique, est, même actuellement, de beaucoup préférable à l'ancien, et que le public ne tardera pas à l'apprécier à sa valeur. En effet, la photographie, suivie du gillotage, nous rend l'œuvre de l'artiste lui-même : c'est un fac-simile. Le graveur sur bois, au contraire, est forcé d'interpréter, par des lignes et des tailles régulières, mais froides, l'intention du dessinateur ; l'œuvre originale y perd la majeure partie de son charme. »

Ceux de nos lecteurs qui ont entre les mains le bel ouvrage d'Albert Jacquemart, l'*Histoire du mobilier*, peuvent constater la justesse de l'appréciation qui précède, en admirant les 200 eaux-fortes typographiques qui illustrent cet ouvrage. Ce

sionnabilité de la gélatine chromatée et sur l'insolubilité que cette substance acquiert sous l'influence de la lumière. Mais nous ne serons que juste en citant les noms des inventeurs et les procédés Nègre, Baldus, Placet, Garnier et Dujardin, Tessié du Motay, Jeanrenaud, Albert (de Munich), Gillot, Michaut.



SPÉCIMEN D'HÉLIOGRAVURE

(procédé Gillot).

sont autant de *fac-simile* photographiques des dessins originaux de M. Jules Jacquemart, le fils de l'auteur, fac-simile reproduits par le procédé Gillot. La planche XXV permettra à ceux qui ne possèdent point l'ouvrage dont nous parlons, d'en juger par un exemple.

§ 5. PHOTOGLYPTIE OU PROCÉDÉ WOODBURY.

Un procédé curieux d'héliogravure, dérivé de celui de M. Poitevin, a été inventé par un photographe anglais, M. Woodbury, qui le désigne sous le nom d'*impression en relief* ou de *photoglyptie*. Après avoir obtenu sur une feuille de tôle recouverte de gélatine bichromatée les reliefs et les creux provenant du gonflement inégal de la gélatine impressionnée à la lumière, la plaque est séchée à une douce chaleur. Les parties gonflées ou en relief sont les ombres de l'image. Cela fait, M. Woodbury soumet la plaque en relief recouverte d'une plaque de métal (mélange d'alliage d'imprimerie et de plomb) à l'action d'une presse hydraulique. Les reliefs de la gélatine s'impriment en creux dans le métal[1].

C'est la plaque métallique, le cliché ainsi obtenu, qui sert à l'impression. Mais ce mode d'impression est lui-même abso-

1. Cette opération semble au premier abord singulière, et le résultat en est assez extraordinaire pour que nous la décrivions en détail. Qu'un coin en acier imprime son empreinte sur un métal plus mou, bronze, or ou argent, cela se conçoit; on comprend moins comment une substance telle que la gélatine peut produire le même effet sur du métal. C'est que la gélatine durcie est extrêmement résistante et que l'alliage de plomb et d'antimoine est relativement plus mou. Sous l'action d'une force considérable et instantanée, l'empreinte se produit. C'est là un fait qui paraissait impossible avant l'invention de la photoglyptie.

Voici comment on procède :

Après avoir séché au chlorure de calcium la feuille de gélatine sur laquelle la lumière a permis d'obtenir une image en relief du cliché photographique, on la place sur une plaque en acier et on la recouvre, du côté du relief, d'une lame métallique (plomb et antimoine). On soumet l'ensemble à la pression d'une puissante presse hydraulique; cette pression, répartie sur la plaque, varie avec son étendue, mais elle n'est jamais moindre de centaines de milliers de kilogrammes.

En retirant l'ensemble de la presse, on voit sur la lame de plomb l'empreinte parfaitement exacte de l'image de la feuille de gélatine; les reliefs sont venus en creux avec une fidélité admirable.

lument original. Il consiste à verser une encre fluide (gélatine colorée au charbon ou autrement) sur le cliché, à placer au-dessus de l'encre la feuille de papier à imprimer et à soumettre le tout à la presse (fig. 350).

Qu'arrive-t-il alors?

C'est que la feuille de papier, pressée par une plaque de verre, fait sortir par les bords du moule tout l'excès d'encre, et les creux seuls se trouvent remplis. Aussitôt l'encre séchée et durcie, le papier enlevé de la presse emporte avec lui la couche



Fig. 350. — Presse pour l'impression photoglyptique.

gélatineuse colorée. Celle-ci forme alors sur le papier un dessin en relief, qui dure d'ailleurs peu de temps, parce que, en séchant sur le papier, les épaisseurs de l'encre colorée se réduisent proportionnellement. Mais partout où l'épaisseur de l'encre était plus considérable, la teinte reste plus forte, elle va en se dégradant jusqu'au blanc, en raison inverse du degré d'épaisseur, c'est-à-dire de la forme du moule, ou enfin selon la force des demi-teintes et des lumières.

La photoglyptie ne peut s'appliquer qu'à des planches d'étendue limitée, à cause de la pression considérable qu'exige la production du cliché métallique. Malgré les difficultés crois-

santes qu'on rencontre sur ce point, les perfectio
portés au procédé par M. Rousselon (de la maiso
épreuves photoglyptiques ont pu être successiven
dans leurs dimensions.

« Ce mode d'impression, dit M. Davanne, se
ment à toutes les applications diverses de la ph
surtout à celles qui demandent un modelé délicat;
employée pour les éditions de portraits de person
et pour la reproduction de tableaux. »

§ 6. HÉLIOCHROMIE.

Disons enfin quelques mots d'un problème dor
est beaucoup moins avancée que celle de la gravu
phique, mais qui néanmoins a déjà été l'objet d'e
sants. Nous voulons parler de la reproduction des
les images, sans autre intervention que celle de la
a donné à cette application particulière de l'art ph
et de la physique le nom d'*héliochromie*.

Quand on regarde sur l'écran de la chambre noi
paysage qui s'y trouve reproduit en miniature, to
représentés se peignent au foyer comme en un
toute la variété des nuances et des couleurs dont ils
dans la nature. On comprend qu'on ait eu la pen
ainsi cette image si fidèle, mais comment? Existe-t
stance sensible qui, non seulement puisse être im
différemment selon la couleur des rayons lumi
frappent, mais garde encore cette impression exacte
aux yeux telle qu'elle l'a reçue?

Tel est le problème dans toute son étendue. Il es
résolu ; cependant ce qui a été déjà fait dans cette
d'espérer que la solution n'en est pas impossible.

Dès 1848, M. Edmond Becquerel annonçait à l'Ac
sciences qu'il était parvenu à fixer sur une même

sible le spectre solaire avec toutes ses couleurs. Il prenait une feuille de plaqué d'argent à la surface de laquelle il déposait une couche de chlorure par l'immersion dans une dissolution d'acide chlorhydrique actionnée par la pile. Quand la couleur de la couche sensible atteignait, pour la seconde fois, une teinte violet-rose, il la soumettait à la lumière d'un spectre obtenu à l'aide d'une lentille. « La couche sensible s'impressionne alors en rouge dans le rouge, en jaune dans le jaune, en vert dans le vert, en bleu dans le bleu et en violet dans le violet. La teinte rougeâtre tourne au pourpre, à l'extrême rouge et même s'étend au delà de la raie A de Frauenhofer ; quant à la teinte violette, elle continue bien au delà de H en s'affaiblissant graduellement. En laissant continuer l'action du spectre, les teintes se foncent et l'image finit par prendre l'éclat métallique ; les couleurs ont alors disparu. »

Les couleurs ainsi obtenues se conservaient quelque temps dans l'obscurité ; mais elles disparaissaient à la lumière du jour, et M. Becquerel ne parvint point à les fixer.

Chose curieuse, la lumière blanche s'imprimait en noir sur la plaque ; mais, en recuisant la plaque à une température de 80 à 100 degrés, la lumière blanche produisait une impression blanche.

En appliquant sur la plaque chlorurée une gravure coloriée, M. Edmond Becquerel obtint aussi, par une exposition suffisamment prolongée à la lumière solaire, la reproduction des couleurs de l'image ; mais il fallait interposer un écran de sulfate de quinine pour empêcher l'action des rayons ultra-violets, qui eussent donné à toute l'image une teinte grisâtre.

Parmi les tentatives faites dans la même voie que celle de M. Ed. Becquerel, il faut citer celles de M. Poitevin, qui a obtenu la plupart des couleurs du spectre, principalement les couleurs rouge, orangé et jaune sur un papier au sel d'argent recouvert d'une couche formée par une solution d'un bichromate alcalin, mélangée elle-même d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre et d'une dissolution à 5 pour 100 de chlorure de potas-

sium. Du papier ainsi préparé, soumis à l'insolation pendant 10 minutes à travers une peinture sur verre, en reproduit les couleurs.

Malheureusement ces résultats, qui offrent un grand intérêt au point de vue de la science, n'ont pu entrer dans la pratique de l'art photographique. Ces couleurs données par la lumière ne restent sur la plaque sensible qu'autant qu'elles sont conservées dans l'obscurité complète ; on ne peut les observer qu'à la hâte, et à la lumière du jour elles ne tardent point à s'évanouir. Tous les efforts tentés jusqu'ici pour les fixer ont échoué.

Ne pouvant résoudre le problème dans son intégrité, quelques chercheurs ont essayé une autre voie. S'inspirant sans doute des procédés de la chromolithographie, ils ont songé à obtenir séparément les couleurs dont la combinaison est susceptible de reproduire les couleurs des objets. Avec trois épreuves, dont l'une donnerait le rouge, la seconde le jaune, la troisième le bleu, on pourrait, par superposition ou réunion, obtenir les couleurs composées. Deux photographes, MM. Cros et Ducos du Hauron, indiquèrent séparément cette solution. Voici, d'après l'*Annuaire photographique* de M. Davanne, quel est le procédé de M. Ducos du Hauron.

On tire d'abord trois épreuves négatives dont l'une servira à faire le positif rouge, la seconde le positif jaune, la troisième le positif bleu. « Pour faire le négatif bleu, il faut éteindre toutes les teintes bleues simples ou composées du sujet à reproduire, afin qu'elles n'aient aucune action sur la couche sensible : pour cela, on doit prendre l'épreuve à travers un verre rouge-orangé. Après une pose, qui sans doute doit être fort longue, on obtient une image dans laquelle le bleu et les composés n'ont eu qu'une très faible action sur la couche sensible, tandis que le jaune est suffisamment accusé. Le cliché représentant le négatif du rouge s'obtient en éteignant les rayons rouges au moyen d'un verre vert. Pour le jaune, on prend l'épreuve en interposant un verre violet.

« Ces trois clichés servent à faire chacun une épreuve posi-

tive que l'on peut obtenir avec des mélanges de gélatine et de bichromate de potasse additionnés de la matière colorante nécessaire, soit un mélange rouge, un jaune, un bleu. Les surfaces gélatinées étant prêtes sur subjectiles transparents, on les impressionne sous les clichés correspondants. Celui obtenu avec le verre bleu violacé est posé sur la couche jaune, et par le lavage on obtient une épreuve monochrome jaune; le cliché obtenu avec le verre vert est employé sur la gélatine rouge, celui qui résulte de l'interposition du verre rouge-orangé est mis sur la gélatine bleue. Après exposition, développement, dessiccation des images, celles-ci sont superposées et donnent l'épreuve polychrome avec toute la série des dégradations de teintes. »

Les épreuves obtenues par M. Ducos du Hauron montrent que les choses se passent ainsi que l'indiquent les idées théoriques qui l'ont amené à formuler son procédé. C'est donc un résultat intéressant, mais il s'en faut encore que le véritable problème de la fixation des couleurs naturelles soit résolu.

Le procédé de M. Cros ne diffère pas en principe de celui que nous venons de décrire; il consiste à prendre trois clichés du tableau coloré à reproduire, le premier à travers un écran *vert*, le second à travers un écran *violet*, le troisième à travers un écran *orangé*. Les écrans sont des cuves plates ou glaces contenant des substances colorées titrées. Dans le but de compenser l'inégal pouvoir actinique de ces lumières, l'inventeur imprègne les plaques sensibles de certaines substances colorantes organiques, telles que la chlorophylle, la carthamine, le curcuma. Enfin la couche sensible est elle-même constituée par un collodion contenant 3 pour 100 de bromure de cadmium qu'il plonge dans un bain de 100 parties d'eau et de 20 de nitrate d'argent. Après lavage, on trempe dans une solution de bromure de potassium et la couche est alors imprégnée de la substance organique.

L'image héliochromique définitive s'obtient ensuite en tirant avec les trois négatifs ainsi obtenus les trois couleurs rouge, jaune et bleue dont la superposition doit donner les diverses teintes colorées du tableau.

CHAPITRE IX

APPLICATIONS DE LA PHOTOGRAPHIE

§ 1. APPLICATIONS DE LA PHOTOGRAPHIE AUX ARTS ET AUX SCIENCES PHYSIQUES ET NATURELLES.

Tels sont, dans leurs traits les plus essentiels, les procédés de cet art nouveau, l'une des applications les plus originales des lois de la physique combinées avec celles de la chimie. Tels sont les principaux progrès réalisés depuis Daguerre. Nous n'avons fait, bien entendu, que donner une idée des méthodes diverses qui constituent la pratique photographique, en essayant de les rattacher aux principes de la science; mais tout n'est pas expliqué encore dans les réactions que détermine l'influence des ondes lumineuses, et c'est aux physiciens et aux chimistes, plus qu'aux photographes de profession, même les plus habiles, qu'incombe la tâche de dissiper l'obscurité qui règne encore sur ce point.

Telle qu'elle est, la photographie a déjà rendu aux arts et aux sciences les plus éminents services. Elle est elle-même, à un certain point de vue, un art qui exige de ceux qui le cultivent des facultés indépendantes de l'habileté technique. Le choix des sujets, dans le portrait comme dans le paysage, l'arrangement des poses, l'étude de l'éclairement le plus favorable à une reproduction véritablement artistique, supposent des facultés que l'éducation peut développer si le sentiment intime préexiste, mais qui ne sont pas données à tous les praticiens,

quelque familiarisés qu'ils soient avec les manipulations photographiques.

Quant aux services rendus aux sciences et aux arts par la photographie, ils sont, nous le répétons, incontestables. Grâce à elle, les productions de l'art dans tous les pays du monde sont reproduites avec une fidélité irréprochable. Cela est de toute évidence pour les vues des monuments d'architecture, ainsi que pour les œuvres de la sculpture. Tous les objets en



Fig. 354. — Microscope photographique.

relief offrent une netteté dans les détails et dans l'ensemble, une exactitude dans le dessin que la gravure égale à grand'peine, qu'elle ne peut, en tout cas, surpasser. D'ailleurs, les vues photographiques de ce genre sont les plus utiles auxiliaires du dessinateur, du graveur ou du peintre. Il n'en est pas tout à fait ainsi pour les tableaux peints, parce que les diverses couleurs n'ont pas la même action photogénique sur les substances impressionnables ; ainsi, les bleus viennent plus clairs, les jaunes et les verts sont souvent noirs, de sorte que la reproduction d'un tableau peint, bonne pour le dessin, est en général mé-

diocre au point de vue de la couleur. Les copies de ce genre n'en ont pas moins le charme d'une fidélité que les copies peintes ne peuvent égaler en ce qui concerne le dessin et l'ensemble[1].

Les fac-simile des gravures anciennes ou rares, dont les planches originales ont disparu ou sont usées, sont admirablement reproduits par la photographie, et là encore celle-ci

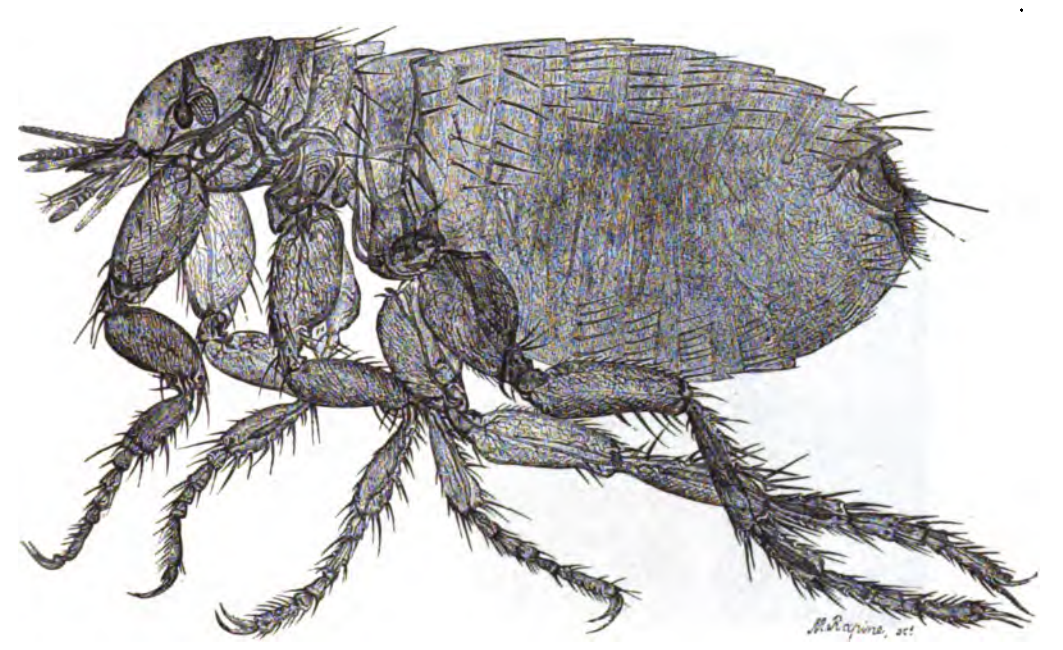


Fig. 352. — Une puce. Fac-simile d'une photographie microscopique.

rend et ne cessera de rendre aux artistes et aux amateurs des services signalés.

Les réserves qu'il faut faire au point de vue purement artistique n'existent plus, si nous passons aux applications de la photographie aux sciences positives, physiques et naturelles.

1. « Les artistes commencent à mieux apprécier tous les avantages que leur offre la photographie pour la vulgarisation de leurs œuvres, et il en est peu maintenant qui songent à réclamer le secours de la gravure au burin. La photographie, en effet, leur offre de nombreuses ressources, avec une rapidité d'exécution que le graveur ne peut leur donner. Aussi tableaux, dessins à la plume, au crayon, au fusain, passent-ils maintenant dans l'atelier du photographe et, suivant le goût ou les intentions de l'artiste, ils peuvent être rendus par les divers procédés photographiques. » (Davanne.)

La géographie, l'ethnologie, l'anthropologie en profitent les premières. La reproduction des sites, des montagnes, et de leur profil, de leurs dispositions naturelles, celle des villes, des monuments, des ports, des habitants des divers pays, de leurs costumes, des objets de toute sorte, ustensiles, armes, etc., sont désormais à l'abri de l'inhabileté des dessinateurs, de l'infidélité souvent involontaire, quelquefois voulue, des narrateurs, des voyageurs, le procédé ne permettant aucune exagération, ni flatterie, ni dénigrement. Quelle précieuse ressource, surtout pour les anthropologistes qui pourront rassembler ainsi désormais les types vrais des races humaines et de leurs innombrables variétés !

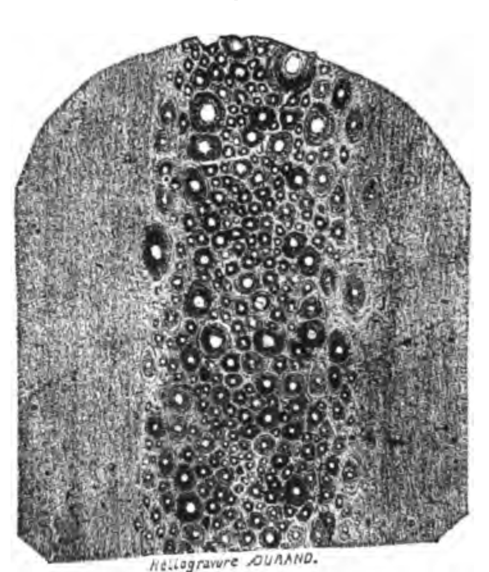


Fig. 355. — Coupe d'un fanon de baleine. Reproduction d'une photographie microscopique par le procédé d'héliogravure Durand.

L'histoire naturelle, la médecine, l'anatomie et la physiologie ne sont pas moins intéressées aux applications de la photographie par les ressources infinies qu'elles peuvent en tirer pour leurs études spéciales. Les préparations qui ne peuvent se conserver qu'à grands frais, les anomalies végétales ou animales, ou humaines, une fois fixées par la lumière avec leurs véritables formes, leurs particularités les plus minutieuses, ainsi multipliées pour les savants, multiplieront de même les sujets d'étude en servant de base certaine à la discussion des hommes de science. Grâce à la photomicrographie et aux procédés d'agrandissement, l'étude des tissus végétaux et animaux, celle des êtres infiniment petits que révèle le microscope, reçoit et recevra de plus en plus un secours immense. Il est inutile d'en développer les raisons. Ce que nous avons dit pour

l'homme et les races humaines, on peut le répéter pour les innombrables espèces animales et végétales, que des dessinateurs d'une grande habileté savent sans doute reproduire, mais non sans beaucoup de temps et de travail. D'ailleurs, ces dessinateurs de talent sont rares. Chaque explorateur, chaque voyageur dans des contrées inexplorées ou mal connues, ne peut prétendre à posséder cet art difficile. Muni d'un appareil photographique et des substances convenables, il peut obtenir, avec un travail et un temps relativement minimes, une masse considérable de documents qui auront surtout cela de précieux, qu'aucun doute ne peut subsister sur la fidélité de l'agent qui les a dessinés et fixés.

§ 2. LA PHOTOGRAPHIE APPLIQUÉE A L'ASTRONOMIE.

De l'infiniment petit, la photographie a pu passer à l'infiniment grand. Les phénomènes célestes n'ont pas échappé à son action. On a photographié le Soleil et ses taches, la Lune et ses montagnes, les éclipses et les particularités physiques qu'elles ont offertes; on s'est essayé sur les planètes et sur les constellations étoilées.

Le dernier mot n'est pas dit sur les services que l'astronomie retirera peut-être un jour de cet art merveilleux de la photographie; mais quelle que soit l'importance de ceux qu'elle a déjà reçus, peut-être n'a-t-on pas toujours bien compris le véritable rôle de la photographie astronomique et l'influence qu'elle peut avoir sur les progrès de la science elle-même. Tous les astronomes ne sont pas d'accord à ce sujet, et nous croyons qu'on lira avec intérêt les remarques et les réserves faites, il y a une douzaine d'années, par un astronome qui avait autant d'expérience et de science que de modestie, l'auteur de la *Sélénographie*, le vénérable Mædler. Nous ferons suivre ces observations d'un court résumé des progrès réalisés par la photographie céleste dans ce court intervalle de temps, et l'on



pourra ainsi se rendre compte du chemin qui reste encore à faire pour réaliser les espérances conçues.

« La plupart des personnes qui m'écoutent, dit Mædler, peuvent encore se rappeler qu'aussitôt après la découverte de la photographie, on entendit exprimer des espérances qui n'ont d'analogues que celles de Descartes et de ses contemporains à la suite de la découverte des lunettes astronomiques. On plaignait les malheureux savants qui avaient passé toute leur vie sans interruption à observer, à mesurer et à dessiner. Non-seulement on devait faire la même chose sans peine, et dans un temps bien moindre, mais on devait obtenir des résultats bien meilleurs, beaucoup plus exacts, beaucoup plus détaillés qu'anciennement. Ce qui m'a coûté sept années, la détermination de la surface de la Lune, devait être bien mieux fait en sept secondes.

« Aujourd'hui, trente années se sont écoulées depuis la découverte de Daguerre; comment ces espérances ambitieuses ont-elles été exaucées?

« Warren de la Rue en Angleterre, William Cranch Bond en Amérique, et d'autres, ont mis courageusement la main à l'œuvre. Ils ont adapté de puissantes lunettes astronomiques à des appareils photographiques, et ils sont également arrivés à donner à leurs appareils, pendant le court intervalle de temps nécessaire à la production des épreuves, le même mouvement que les corps célestes dont ils se proposaient de voir l'image. Ainsi la Lune a été photographiée dans ses différentes phases; mais les détails sont restés bien au-dessous de ceux qu'un habile observateur peut déterminer. Bond s'est occupé des étoiles fixes, et il disposait d'une lunette astronomique permettant d'apercevoir les étoiles de quatorzième grandeur; mais il n'a pu obtenir que des images faibles, à peine visibles, des étoiles de cinquième grandeur.

« Nous pourrions citer, il est vrai, des dessins très précieux que nous devons à la photographie astronomique; mais ce ne sont point les détails du ciel étoilé que l'on peut atteindre de cette manière et que l'on peut conserver ainsi : ce sont des

phénomènes relatifs aux objets connus depuis longtemps et réfléchissant une forte lumière.

« Je citerai, en premier lieu, les taches du Soleil, dont le dessin demande une faible fraction de seconde, et qui sont reproduites avec une grande netteté. Cependant, même dans cette circonstance, on n'arrive point à fixer les détails que de bons observateurs habitués à ces phénomènes peuvent reproduire; mais on obtient, ce qui est très important dans l'espèce, une image du Soleil pour un moment déterminé, et, si l'on nous permet de nous servir d'une expression de sir John Herschel, on oblige le Soleil à nous écrire sa propre histoire.

« Ces expériences seront, ou, pour parler plus exactement, ont déjà été très utiles, particulièrement dans les éclipses totales de Soleil. Il n'y a pas de dessinateur, quelque expéditif qu'on le suppose, qui puisse faire en deux ou trois minutes, durée ordinaire du phénomène, ce que Warren de la Rue a fait en Espagne lors de la dernière éclipse de Soleil; car, si l'on suppose que tout ait été préparé, on peut obtenir, non pas seulement trois, mais douze ou quinze images d'un phénomène qui disparaît si rapidement. Pour les planètes, même pour les grosses, la photographie est de peu d'usage et nous apprendra peu de choses nouvelles. L'expérience sera encore moins utile quand elle s'appliquera aux étoiles. On a photographié le groupe des Pléiades et celui d'Orion, et l'on pouvait bien reconnaître les constellations dans les images ainsi obtenues; mais un œil sain, sans lunettes, voyait plus de choses dans le ciel pue la photographie ne lui en montrait. Nous nous félicitons du nouveau moyen d'étude que plusieurs observatoires, parmi lesquels nous citerons l'observatoire de Wilna, possèdent d'une façon complète, ou peu s'en faut; mais nous n'attendrons pas que la sphère d'action de l'astronomie pratique puisse être agrandie par son intervention, et l'art des observations ne sera pas bouleversé par la découverte de la photographie, comme il l'a été lors de l'invention de la lunette astronomique. »

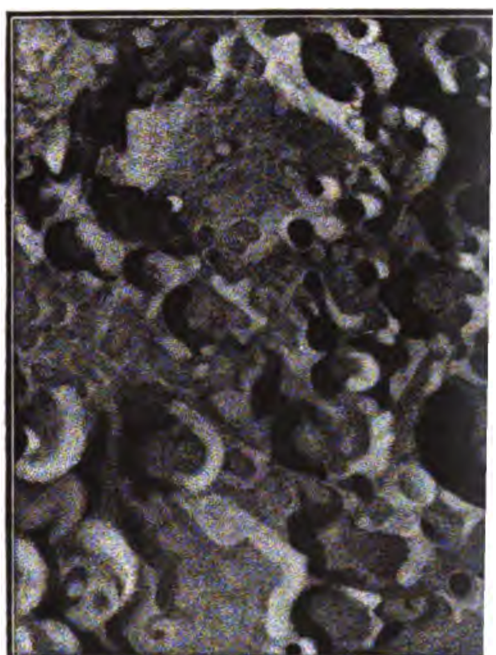
La planche XXVI, qui représente deux portions identiques

de la Lune, permettait de constater l'exactitude du jugement porté par Mædler, du moins à l'époque (1868) où il fit la conférence dont nous venons de reproduire un fragment : la première portion est un fac-simile de la carte sélénographique dessinée par l'illustre astronome ; l'autre est la reproduction d'une belle photographie lunaire amplifiée due à M. Warren de la Rue. Dans celle-ci, le relief de la surface est admirablement accusé par les oppositions des lumières et des ombres ; mais on n'y distingue point une foule de détails topographiques d'un grand intérêt que l'astronome, aidé de puissants instruments, a dessinés nettement et qui font de sa belle carte de la Lune un monument précieux pour les futures recherches de sélénographie.

Toutefois depuis, des perfectionnements apportés aux appareils ont permis d'obtenir des photographies de la Lune beaucoup plus précises, bien que, comme l'a dit justement M. Faye, elles ne puissent dispenser ni du secours d'une carte de la Lune bien faite, comme celle de Beer et de Mædler ou encore de Schmidt, ni de l'étude de la Lune elle-même au moyen de puissants télescopes. Un astronome américain, M. Rutherford, a obtenu des épreuves fort belles du disque lunaire, à l'aide d'un objectif achromatique de 13 pouces de diamètre, auquel était jointe une troisième lentille dont la densité et la courbure avaient été calculées de manière à donner à l'ensemble l'achromatisme chimique.

Adapté à une lunette équatoriale que faisait mouvoir un excellent mouvement d'horlogerie, l'objectif de M. Rutherford fournit un négatif d'environ 4 pouces (101 millimètres) de diamètre, qui donna lui-même une épreuve positive de même grandeur. La durée de la pose, d'un quart de seconde à la Pleine Lune, était de deux secondes au Premier ou au Dernier Quartier. Enfin, le positif soumis à un appareil d'agrandissement dans la lumière solaire convergente a donné les magnifiques épreuves de la Lune que connaissent aujourd'hui tous les astronomes et qui nous montrent notre satellite avec tous les





PHOTOGRAPHIE CÉLES

1. Montagnes lunaires, d'après la carte de la Lune de
région, d'après une photographie de M

dont les coulées auraient comblé la cavité précédemment observée et dessinée?

Le pour et le contre ont été longuement discutés : on comprend combien, dans cette circonstance eussent été précieux des documents impersonnels, tels que des épreuves photographiques, surtout quand il s'agissait de décider s'il y avait eu disparition d'objets préalablement représentés.

On a eu l'idée de prendre des vues photographiques de la Lune à un intervalle de temps suffisant pour que, grâce au changement qui provient de la libration, les épreuves convinsent à la vue stéréoscopique. Ainsi observées, les diverses aspérités lunaires offrent un relief d'une netteté extraordinaire, et la courbure de l'hémisphère semble très sensible. Cet hémisphère, d'après la théorie, doit être allongé vers la Terre. Or cette conclusion a été, paraît-il, établie par la discussion de mesures micrométriques effectuées par un astronome russe, M. Goussef, sur les épreuves de deux photographies de la Lune. M. Warren de la Rue a pris pareillement en 1868, à deux jours d'intervalle, deux vues photographiques d'une même tache solaire; l'examen stéréoscopique des deux images a mis en évidence la dépression de la surface solaire à l'endroit de la tache.

La photographie céleste ne s'est pas seulement attaquée au Soleil et à la Lune. Warren de la Rue, qui a obtenu le premier de belles épreuves lunaires, a tourné son objectif vers les planètes : Saturne et Jupiter ont été photographiés; le même savant a photographié des vues stéréoscopiques de la planète Saturne et de son anneau. Enfin, les étoiles et les nébuleuses ont eu leur tour et, après des essais infructueux, ont marqué leur image sur le collodion. Avec un objectif de 11 pouces d'ouverture, M. Rutherford a pu, en moins de 3 minutes, photographier les étoiles jusqu'à la 9e grandeur. La durée de pose, pour ces expériences, variait non seulement avec les circonstances atmosphériques, mais avec l'éclat stellaire. En une demi-seconde l'étoile double de Castor donnait une impression

parfaitement nette. Le même savant a obtenu des groupes stellaires, tels que les Pléiades, P Le directeur de l'observatoire de Cordoba, M. (venu également à photographier plusieurs a citons le beau groupe qui entoure Êta du Na de ce groupe ne contenait pas moins de 180 é grand nombre ne dépassent pas en éclat la 9ᵉ g

Ces résultats suffiraient à montrer quels ser graphie peut rendre à la partie de l'astronomie q l'étude physique des astres. Mais elle a été aussi a observations de précision : pendant le phénomè de la planète Vénus sur le Soleil en décembre 1 breuses photographies ont été prises aux divers passage; il ne semble pas toutefois que cet essai comme on aurait pu le croire, aux espérances qu çues plusieurs astronomes. Peut-être sera-t-on au prochain passage, qui aura lieu en décembre 1

§ 3. APPLICATIONS DIVERSES DE LA PHOTOGRAPHIE

L'énumération que nous avons faite plus haut que la photographie est appelée à rendre et a déj sciences et aux arts, ne peut donner qu'une idée faits de l'importance que cette application de la prend de plus en plus dans nos sociétés civilisées. exposition française de photographie renfermait à c spécimens remarquables, dont nous allons, pour chapitre, donner une rapide analyse.

Parlons d'abord des applications scientifiques. L phie astronomique y était représentée par des épreu riennes du passage de la planète Vénus sur le Solei épreuves positives des taches solaires, et par les b graphies lunaires de Rutherford et de Warren de la nous avons traité longuement déjà ce sujet. L'obse

Kew avait exposé des diagrammes météorologiques indiquant les oscillations du baromètre à mercure, les variations du thermomètre à boule sèche et à boule mouillée et enfin celles des instruments magnétiques, donnant jour par jour les composantes horizontale et verticale du magnétisme terrestre. Tous ces tracés ont été obtenus par la photographie, de sorte que les documents si précieux de la science météorologique peuvent être ainsi enregistrés automatiquement et d'une manière continue.

Parmi les épreuves photomicrographiques d'histoire naturelle, de biologie, de botanique, d'entomologie, on remarquait celles qui avaient pour objet l'étude du phylloxéra à ses diverses phases de développement. Mais nous devons mentionner comme particulièrement remarquable une série d'épreuves représentant des coupes du cerveau humain et de la moelle épinière à l'état normal et à l'état pathologique. Ces épreuves, dues au docteur Luys, permettaient de comparer immédiatement les régions saines et les régions similaires du système nerveux frappées par la maladie, et par suite de se faire d'un coup d'œil une idée précise du degré d'intensité et de l'étendue de la dégénérescence morbide. Considérée surtout au point de vue de la diffusion de l'enseignement, cette représentation fidèle, presque impossible sans la photographie, des délicates observations de la haute science, a une portée que le lecteur comprendra sans peine. L'une de ces épreuves donnait la représentation du cerveau d'un amputé qui avait subi la désarticulation de l'épaule. « Pendant tout le temps que le malade a vécu (vingt ans), les régions du cerveau qui recevaient les impressions sensitives de son bras réséqué, celles que lui communiquait le mouvement volontaire étant demeurées silencieuses, il en est résulté une atrophie localisée dans certains points de la substance cérébrale, et en comparant cette épreuve avec la voisine qui représente l'état normal des mêmes régions, on est frappé de la démonstration qui résulte de cet examen. » Dans d'autres épreuves, on pouvait suivre de l'œil le progrès de la désorga-

D'autres fois, c'est le dessin et la gravure qui sont à la fois confiés à la photographie.

Cette fidélité des reproductions photographiques est éminemment utile à certains travaux, par exemple aux études archéologiques et paléographiques. Les voyageurs chargés de missions scientifiques peuvent ainsi obtenir rapidement des vues de monuments, reproduire avec leurs détails les plus minutieux les inscriptions anciennes que les savants des Académies pourront ensuite discuter à loisir, l'épreuve en main, sans craindre les erreurs d'un copiste. Même avantage, même utilité pour les études des textes les plus rares. Écoutons ce que dit sur ce point le savant directeur de la Bibliothèque nationale, M. Léopold Delisle : « La photographie, dit-il, devait amener une révolution dans les études paléographiques. Désormais les manuscrits les plus importants pourront être reproduits avec une rigoureuse exactitude, depuis la première jusqu'à la dernière page, et un jour viendra où toutes les grandes bibliothèques auront les équivalents de quelques-uns de ces livres antiques qui font la gloire des bibliothèques de Rome, de Florence, de Milan, de Vienne, de Paris et de Londres. Le Psautier de l'université d'Utrecht vient d'être, au Musée Britannique, l'objet d'une publication peu coûteuse, dans laquelle on peut étudier avec confiance les plus curieux monuments de la calligraphie et du dessin au huitième et au neuvième siècle. »

Les diverses administrations publiques commencent à utiliser les ressources de la photographie. Depuis quelques années déjà, la police emploie ce moyen pour constater l'identité des individus soumis par la loi à sa surveillance ou des criminels soupçonnés de récidive. La justice civile emploie la photographie dans des cas spéciaux où il s'agit de produire des pièces devant servir de témoignages dans les procès : telles sont les copies photographiques de testaments. Dans les procès criminels, on peut fournir des documents d'une haute importance pour éclairer la conscience des jurés et des juges, constatation des lieux, portraits et situation des victimes, des criminels,

constatation des faux par les agrandissements
reproduction des écritures effacées.

Par ces exemples, que nous pourrions aisém
on voit que la photographie ne rend pas seuleme
aux arts et aux sciences, mais qu'elle devient d
un élément d'informations indispensable aux div
trations publiques ; à ce point de vue, elle tend
véritable importance sociale.

FIN DU DEUXIÈME VOLUME.

TABLE DES F

PLANCHES EN NOIR ET I

N°s des planches.

I. Réflexion de la lumière. Le lac du miroir dans l:
II. Spectres des métaux. . . . .
III. Spectres des métalloïdes . . . .
III *bis*. Phosphorescence de la mer. . . . . . .
IV. Franges monochromatiques. Phénomènes d'int
petites ouvertures . . . .
V. Franges polychromatiques. Phénomènes d'inte
réseaux . . . .
VI. La bulle de savon. Phénomènes d'interférence ; a
minces . . . .
VII. Anneaux colorés dans les cristaux biréfringents
VIII. Classification des couleurs d'après le système de
tique des couleurs franches . . . .
IX. Classification des couleurs d'après le système de
tique des couleurs rabattues à 9/10 de noir. .
X. Gammes chromatiques du violet et du jaune. . .
XI. Le mirage dans les déserts de l'Afrique . . . .
XII. Effet de mirage inverse. Le navire Hudson dans l
XIII. Arc-en-ciel double. . . . .
XIV. Les spectres au théâtre. . . . .
XV. Le microscope appliqué à l'étude des minéraux .
XVI. Le microscope appliqué à l'étude des végétaux .
XVII. Le microscope appliqué à l'étude des animaux. .
XVIII. Grande lunette équatoriale de l'Observatoire de P
XIX. Grande lunette méridienne de l'Observatoire de P
XX. Télescope de lord Rosse à Parsontown (Irlande).
XXI. Télescope à miroir argenté de Léon Foucault. Syst
XXII. Le télescope appliqué à l'étude du ciel . . . .
XXIII. Télescope de Tulse Hill, installé par W. Huggins
scopie. . . . .
XXIV. Spécimen d'héliogravure (système A. Durand). Po
XXV. Spécimen d'héliogravure (système Gillot). . . .
XXVI. Photographie céleste. 1. Montagnes lunaires, d'
Beer et Mædler. 2. La même région, d'après u
ren de la Rue. . . . .

FIGURES INSÉRÉES DANS LE TEXTE

N°s.		Pages.
1.	La lumière dans la nature. Paysage de la zone tempérée	7
2.	La lumière dans les régions polaires. Disparition du Soleil	8
3.	La lumière dans les régions polaires. Le retour du Soleil	9
4.	Montagnes de la Lune vues au télescope	15
5.	Lumière cendrée	21
6.	Le clair de terre sur la Lune	22
7.	Propagation de la lumière en ligne droite. Faisceau de rayons solaires dans la chambre obscure	31
8.	Propagation rectiligne de la lumière. Les rayons solaires dans l'atmosphère	31
9.	Cône d'ombre d'un corps opaque. Ombre portée	33
10.	Cônes d'ombre et de pénombre	33
11.	Éclipses de Soleil et de Lune	34
12.	Éclipse totale de Soleil	35
13.	Éclipse annulaire de Soleil	36
14.	Éclipse totale de Lune	36
15.	Effets d'ombre et de pénombre. Silhouettes des cartes découpées	38
16.	Image renversée d'une bougie	40
17.	Images rondes et elliptiques du Soleil à travers les ouvertures du feuillage	41
18.	Images produites à l'intérieur de la chambre obscure	42
19.	Expériences de Galilée. Premier essai de mesure de la vitesse de la lumière	43
20.	Positions relatives du Soleil, de la Terre et de la Lune au moment d'une éclipse	45
21.	Mesure de la vitesse de la lumière par les éclipses des satellites de Jupiter	48
22.	Phénomène de l'aberration. Composition des vitesses de la lumière et de la Terre	54
23.	Aberration annuelle	54
24.	Déviation apparente d'un projectile qui frappe un navire en marche	55
25.	Déviation apparente des gouttes de pluie	56
26.	Déviation apparente des gouttes de pluie. Explication	56
27.	Phénomène analogue à l'aberration	57
28.	Appareil de M. Fizeau pour la détermination de la vitesse de la lumière	62
29.	Expériences de M. Fizeau	63
30.	Appareil enregistreur de M. Cornu. Expériences sur la vitesse de la lumière	65
31.	Diagramme de l'appareil enregistreur	65
32.	Méthode de Léon Foucault pour la mesure directe de la vitesse de la lumière	68
33.	Méthode de Léon Foucault pour la mesure directe de la vitesse de la lumière. Déviation de l'image	69
34.	Déviation du rayon réfléchi double de l'angle de rotation	70
35.	Comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau	71
36.	Images de l'ouverture	72
37.	Turbine imprimant le mouvement au miroir	74
38.	Étude expérimentale des lois de la réflexion de la lumière	89
39.	Formation des images vues par réflexion sur un miroir plan	93
40.	Réflexion sur un miroir plan. Champ du miroir pour un objet donné	94
41.	Réflexion sur deux miroirs plans parallèles. Images multiples d'un objet situé entre ces deux miroirs	95
42.	Images multiples sur deux miroirs inclinés à 90°	95
43.	Miroirs à angle droit	96

Nos. Pages.

44. Images dans deux miroirs inclinés à 60°. 96
45. Images dans deux miroirs inclinés de 45°. 96
46. Polémoscope.. 97
47. Images symétriques formées dans le kaléidoscope. . . . 98
48. Lunette magique. 99
49. Miroir concave. Image renversée, plus petite que l'objet. . 101
50. Miroir concave. Image renversée, plus grande que l'objet. . . 102
51. Miroir concave. Image virtuelle, droite et plus grande que l'objet. 102
52. Marche d'un rayon lumineux à la surface d'un miroir concave. 103
53. Miroir concave. Marche et réflexion des rayons parallèles à l'axe. Foyer principal. . . 104
54. Miroirs concaves. Foyers conjugués. 105
55. Miroir concave. Foyer virtuel . 105
56. Miroir concave. Images réelles et renversées des objets. . . 107
57. Miroirs concaves. Image droite et réelle des objets. 107
58. Image droite virtuelle dans les miroirs sphériques convexes. 108
59. Miroir convexe. Image droite et virtuelle. 109
60. Détermination de la distance focale d'un miroir convexe. . . 109
61. Caustique par réflexion. . . . 110
62. Caustique par réflexion. . . . 111
63. Miroir cylindrique. Anamorphose.. 112
64 et 65. Réflexion sur les miroirs coniques. Anamorphoses.. . 113
66. Lumière réfléchie très obliquement.. 115
67. Réflexion irrégulière de la lumière à la surface d'un corps non poli 115
68. Incidence normale; absence de déviation. 118
69. Incidence oblique. Réfraction. . 118
70. Phénomènes de réfraction. Bâton brisé. 119
71. Élévation apparente du fond d'un vase par la réfraction. 120

Nos.

72. Démonstration expé lois de la réfracti
73. Descartes. . . . .
74. Loi du sinus. . . .
75. Explication du bâto
76. Élévation apparent d'une rivière, d'u plication. . . .
77. Réflexion totale, a des rayons émerg
78. Phénomène de réfle
79. Phénomène de réfl dans un prisme r scèle . . . . .
80. Fontaine lumineuse. de réflexion tota
81. Déviation due à la travers des lames rallèles. . . . .
82. Marche d'un rayon travers une lame rallèles. . . . .
83. Marche d'un faiscea
84. Images multiples pr réfraction dans l faces parallèles..
85. Marche des rayons q lieu aux images m lames à faces para
86 Forme géométrique c
87. Prisme monté sur pi
88. Déviation des rayons par les prismes.
89. Images des objets vu les prismes. . . .
90. Loupes ou lentilles à vexes.. . . . . .
91. Lentilles convergente
92. Lentilles divergentes.
93. Axe principal et axe s Rayons de courbure tilles. . . . . . .
94. Axes secondaires des Centre optique. . .
95. Marche des rayons p l'axe. Foyer princip
96. La lentille considéré un assemblage de pr
97. Marche des rayons ém point lumineux su Foyers conjugués. .
98. Marche des rayons éma

Nos.		Pages.
	point situé entre le foyer principal et la lentille. Foyer virtuel.	148
99.	Image réelle, renversée et plus petite que l'objet.	148
100.	Image réelle, renversée et plus grande que l'objet.	149
101.	Image d'un objet situé à une distance de la lentille plus grande que la distance focale principale, et moindre que le double de cette distance. . .	149
102.	Image droite et virtuelle d'un objet situé entre le foyer principal et la lentille.. . .	150
103.	Foyer principal virtuel des lentilles divergentes.	151
104.	Image droite virtuelle et plus petite que l'objet dans une lentille biconcave.	151
105.	Détermination expérimentale de la distance focale d'une lentille divergente.	152
106.	Décomposition de la lumière par le prisme. Inégale réfrangibilité des couleurs du spectre.	157
107.	Recomposition de la lumière par une lentille.	159
108.	Recomposition de la lumière par les prismes.	160
109.	Recomposition de la lumière par un disque tournant.	162
110.	Inégales réfrangibilités des diverses couleurs..	163
111.	Inégales réfrangibilités des couleurs simples. Expérience de Newton.	163
112.	Spectre solaire. Raies de Frauenhofer..	165
113.	Fragment du spectre solaire. Raies comprises entre les groupes D et E.	166
114.	Raies du groupe B vues dans le spectroscope à vision directe de M. A. Thollon.	167
115.	Raies du groupe D, d'après M. Thollon.	168
116.	Raies du groupe *b*, d'après M. Thollon.	168
117.	Spectroscope horizontal. Marche du faisceau lumineux. . . .	170
118.	Spectroscope horizontal. . . .	171
119.	Observation spectroscopique d'un solide métallique. . .	172
120.	Spectroscope horizontal à prismes multiples.	173
121.	Disposition des prismes dans un spectroscope à vision directe.	173
122.	Analyse spectrale des gaz. Tube de Plücker.	175
123.	Analyse spectrale des gaz. Tube de M. Geissler.	175
124.	Analyse spectrale des gaz. Appareil de M. Salet..	176
125.	Raies telluriques de la région D du spectre solaire, d'après J. Janssen	183
126.	Les neuf raies brillantes des protubérances, d'après l'observation faite le 18 août 1868 à Wha-Tonne par M. G. Rayet.	183
127.	Aspect de la chromosphère solaire et des protubérances sur le contour du Soleil.. . . .	185
128.	Analyse spectrale d'une tache solaire. Élargissement des raies sombres sur le noyau et sur la pénombre.	186
129.	Jupiter et ses bandes.	190
130.	Spectre de Jupiter comparé au spectre de la lumière atmosphérique.	191
131.	Les bandes du globe de Saturne, d'après Bond..	192
132.	1, spectre d'Uranus, d'après W. Huggins; 2, raies du spectre atmosphérique.. . .	194
133.	Comète de Winnecke (1868 II).	196
134.	Spectres des comètes de 1868 I et de 1868 II..	197
135.	Spectre de la comète 1873 IV (Henry)..	197
136.	Spectres stellaires.	205
137.	Spectres des deux composantes de l'étoile double β du Cygne.	207
138.	Spectre de l'étoile nouvelle apparue en 1876 dans la constellation du Cygne.	210
139.	Spectres de la lumière des nébuleuses.	213
140.	Courbes des intensités lumineuses des diverses parties du spectre, d'après Frauenhofer..	221

Nos. Pages.

141. Courbes des intensités calorifiques, d'après Muller. . . . 223
142. Courbe des radiations calorifiques dans le spectre de l'arc voltaïque, d'après Tyndall. . 224
143. Partie violette et ultra-violette du spectre solaire. Radiation chimique. 226
144. Courbes des radiations solaires. 227
145. Spectres chimiques ou photogéniques. 228
146. Combustion du fer dans l'oxygène. 232
147. Brûleur de Bunsen. 235
148. Flamme de l'hydrogène carboné. 236
149. Structure de la flamme d'une bougie et coupe de la même flamme. 237
150. Lumière de Drummond. . . . 241
151. Lampe au magnésium 241
152. Lampyre ou ver luisant. . . . 243
153. Pyrophore noctiluque. 243
154. Noctiluque miliaire. 244
155. Méduse campanulaire. 244
156. Physophore hydrostatique. . . 245
157. Expériences de M. E. Becquerel sur la phosphorescence produite par la lumière électrique. 253
158. Phosphoroscope de M. E. Becquerel. 254
159. Disques du phosphoroscope . . 255
160. Fluorescence du sulfate de quinine. 256
161. Fluorescence de l'esculine. . . 257
162. Expérience prouvant que le pouvoir de déterminer la fluorescence est limité.. 259
163. Séparation des radiations lumineuses et des radiations calorifiques par le sulfure de carbone iodé 261
164. Expérience de Tyndall. Phénomène de calorescence. . . . 262
165. Spectre d'absorption du permanganate de potasse. . . . 267
166. Spectre d'absorption du chlorure de chrome 267
167. Spectre d'absorption du chlorure de cobalt concentré. 267
168. Spectre d'absorption du chlorure de cobalt étendu. 267

Nos.

169. S
170. Tl
171. Tl
172. E
173. In
174. E
175. F
176. F
177. E
178. St
179. L
180. A
181. A
182. P
183. Tl
184. Tl
185. É
186. In
187. Po
188. Se
189. Se
190. Cr
191. Cr
192. Pr
193. É

Nos. Pages.
194. Expérience d'Huygens. Variations d'intensité des images provenant de deux faisceaux polarisés par double réfraction. 326
195. Polarisation du rayon ordinaire par double réfraction . . . 327
196. Dédoublement du rayon ordinaire 328
197. Dédoublement du rayon extraordinaire. 328
198. Échantillon de tourmaline de Sibérie. 330
199. Polariscope de Malus perfectionné par Biot. 334
200. Relation entre le rayon polarisé sous l'angle de polarisation d'une substance et le rayon réfracté 336
201. François Arago. 338
202. Couleurs de la lumière polarisée dans les lames minces . . . 340
203. Couleurs de la lumière dans le verre comprimé. 340
204. Couleurs de la lumière polarisée dans le verre trempé. . . . 341
205. Pince à tourmaline. 342
206. Anneaux colorés du spath. . . 344
207. Augustin Fresnel 346
208. Sir John Herschel. 359
209. M. Chevreul 362
210. Loi du carré des distances. . . 380
211. Photomètre de Rumford. . . . 384
212. Photomètre de Ritchie. Coupe; vue extérieure. 365
213. Photomètre de Bunsen; tache vue par réflexion. 386
214. Tache vue par transparence. . 386
215. Photomètre de Bunsen en expérience. 387
216. Photomètre de Bouguer. . . . 388
217. Photomètre de Léon Foucault. . 389
218. Coupe diamétrale antéro-postérieure de l'œil humain. . . 393
219. Expérience permettant de constater l'insensibilité du *punctum cœcum*. 395
220. Formation des images dans un œil normal. 396
221. Formation de l'image dans l'œil d'un presbyte. 399
222. Formation de l'image dans l'œil d'un myope. 399
Nos. Pages.
223. Disques rotatifs; expériences sur la persistance des impressions lumineuses. 404
224. Phénomènes d'irradiation. . . 407
225. Irradiation. Échancrure apparente de l'arête d'une règle. 407
226. Les protubérances solaires pendant une éclipse totale de Soleil (éclipse du 2 décembre 1870). 408
227. Effets d'irradiation. 408
228. Illusion d'optique. 410
229. Illusion d'optique : apparente divergence de lignes parallèles. 411
230. Apparente divergence de lignes parallèles. 411
231. Convergence et divergence alternatives de lignes parallèles . 412
232. Forme hexagonale apparente de cercles tangents : effets d'irradiation. 412
233. Expérience d'astigmatisme . . 414
234. Œil composé des insectes; cornée de mouche. 418
235. Structure de l'œil composé des insectes. 419
236. Appareil Cloëtz et Gratiolet. Décomposition de l'acide carbonique par les plantes aquatiques au soleil. 424
237. Influence des rayons de diverses couleurs sur l'évaporation des feuilles. Expériences de M. Dehérain. 426
238. Expériences de M. Dehérain sur l'influence des rayons du spectre dans le phénomène d'évaporation des feuilles. . . . 427
239. Explication du mirage. 437
240. Marche des rayons efficaces dans une goutte de pluie, après une seule réflexion intérieure. . . 442
241. Marche des rayons efficaces après deux réflexions intérieures. . 442
242. Théorie de l'arc-en-ciel; arc principal et arc secondaire. . 444
243. Halo simple, de 42°. 448
244. Halos de 22° et de 46°; parhélies et cercle parhélique 449
245. Miroirs des anciens Égyptiens . 454
246. Miroir de Venise. 455

N°.		Pages.
247.	Miroir extérieur ou espion. . .	456
248.	Réflecteur.	459
249.	Disposition de la glace sans tain et position du fantôme. . . .	460
250.	Mesure de la hauteur verticale d'un objet.	260
251.	Miroir magique japonais (dessins en relief).	461
252.	Expérience faite avec un miroir magique.	463
253	Principe théorique du sextant. .	465
254.	Le sextant.	465
255.	Officier de marine observant avec le sextant.	467
256.	Goniomètre à réflexion de Wollaston.	469
257.	Principe géométrique du goniomètre. Angle de rotation du cristal.	470
258.	Goniomètre à réflexion de Babinet.	471
259.	Principe géométrique des divers systèmes d'héliostats	473
260.	Héliostat de J. T. Silbermann. .	474
261.	Héliostat de Léon Foucault. . .	475
262.	Le sidérostat	477
263.	Phare catoptrique.	484
264.	Premier appareil lenticulaire de Fresnel. Élévation et plan. .	487
265.	Marche des rayons dans un phare catadioptrique de Fresnel, à lentilles et à miroirs inclinés.	488
266.	Réflexion totale dans les prismes des phares catadioptriques. .	488
267.	Appareil de premier ordre à feu fixe et à lumière blanche. .	490
268.	Appareil de premier ordre à éclipses de minute en minute	490
269.	Appareils à feux blancs et rouges et à éclipses de 20 en 20 secondes.	490
270.	Appareil lenticulaire et lanterne d'un phare de premier ordre.	491
271.	Intérieur du phare de Cordouan.	492
272.	Le phare de la Nouvelle-Calédonie.	492
273.	Marche des rayons lumineux dans la loupe. Grossissement.	494
274.	Loupes de divers genres. . . .	496
275.	Porte-loupe.	497
276.	Porte-loupe, autre modèle. . .	497
277.	Microscopes simples.	498

N°.	
278.	Mi
279.	Lc
280.	M
281.	Oc
282.	Ol
283.	Mi
284.	Mi
285.	Mi
286.	Ob
287.	Mi
288.	Mi
289.	Mi
290.	Mi
291.	Co
292.	Mi
293.	Ch
294.	Le
295.	Ch
296.	Ch
297.	Mé
298.	La
299.	Ph
300.	Ma
301.	Le
302.	Lor
303.	Lor
304.	Ma
305.	Co
306.	Lu
307.	Lu

Nos.		Pages.
308.	Un coin de la constellation des Gémeaux	535
309.	La même partie du ciel vue avec une lunette de 27 centimètres d'ouverture	535
310.	Marche des rayons lumineux dans la lunette terrestre	536
311.	Principe et disposition du télescope front-wiew de W. Herschel	539
312.	Grand télescope front-wiew de W. Herschel, à l'observatoire de Slough	540
313.	Principe et disposition du télescope de Gregory	544
314.	Télescope de Gregory	544
315.	Principe et disposition du télescope de Newton	545
316.	Télescope à miroir argenté de Léon Foucault (système newtonien)	546
317.	Nouveau télescope catadioptrique de MM. Paul et Prosper Henry	557
318.	Théodolite de Gambey	561
319.	Différence entre la vision monoculaire et la vision binoculaire	564
320.	Stéréoscope de réflexion de Wheatstone	566
321.	Épreuves stéréoscopiques. Fac-simile d'une photographie représentant une salle du musée du Louvre	567
322.	Stéréoscope de réfraction. Coupe	568
323.	Stéréoscope de réfraction. Vue extérieure	569
324.	Stéréoscope d'Helmholtz	570
325.	Le pseudoscope	571
326.	Vision stéréoscopique directe et inverse. Relief et creux	571
327.	Vision en relief et vision en creux	572
328.	Disque du phénakisticope	573
329.	Phénakisticope à disque double	574
330.	Phénakisticope	575
331.	Disque du phénakisticope	575
332.	Zootrope	576
333.	Nicéphore Niepce	581
334.	Boîte à mercure pour la révélation des images daguerriennes	585
335.	Fixage de l'épreuve daguerrienne	586
336.	Développement de l'image	596
337.	Chambre noire photographique	599
338.	Chambre noire des photographes à double objectif	600
339.	Appareil photographique de campagne à soufflet	600
340.	Objectif simple	601
341.	Objectif composé, avec glace redressante	601
342.	Microscope adapté à la chambre noire pour la micrographie	608
343.	Études de photomicrographie végétale. Coupe diamétrale de *Canna indica*, d'après M. J. Girard	609
344.	Études de photomicrographie végétale, par M. J. Girard. Une diatomée	610
345.	Photographie microscopique. Fac-simile d'une dépêche expédiée à Paris pendant le siège	610
346.	Agrandissement et lecture microscopiques pendant le siège de Paris	611
347.	Fac-simile d'une gravure héliographique	624
348.	Le soldat de Marathon	626
349.	Réduction de la figure 350 par l'héliogravure	627
350.	Presse pour l'impression photoglyptique	632
351.	Microscope photographique	638
352.	Une puce	639
353.	Coupe d'un fanon de baleine. Reproduction d'une photographie microscopique par le procédé d'héliogravure Durand	640

FIN DE LA TABLE DES FIGURES.

TABLE DES MATIÈRES

LA LUMIÈRE

PREMIÈRE PARTIE

LES PHÉNOMÈNES ET LEURS LOIS

CHAPITRE PREMIER. — LA LUMIÈRE DANS LA NATURE 5
§ 1. Les phénomènes de la lumière à la surface du globe terrestre. 5
§ 2. Phénomènes de la lumière sur les planètes et sur la Lune. 13
§ 3. Les perceptions externes, la lumière et le sens de la vue. 16
§ 4. Les sources de lumière et les milieux optiques. 20

CHAPITRE II. — PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE. 29
§ 1. Propagation de la lumière dans les milieux homogènes. 29
§ 2. Principe de la théorie des ombres. 32
§ 3. La chambre obscure. — Images renversées et colorées des objets extérieurs . 39

CHAPITRE III. — VITESSE DE PROPAGATION DE LA LUMIÈRE 43
§ 1. Premiers essais. — Méthode de Rœmer : vitesse de la lumière mesurée par les éclipses des satellites de Jupiter 43
§ 2. L'aberration. — Vitesse de la lumière comparée à celle de la Terre 52
§ 3. Mesure directe de la vitesse de la lumière. — Méthode de M. Fizeau. . . . 60
§ 4. Mesure directe de la vitesse de la lumière. — Méthode du miroir tournant de Léon Foucault. 66
§ 5. Vitesse de la lumière. — Comparaison des résultats obtenus par les diverses méthodes. 76

CHAPITRE IV. — RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE 81
§ 1. Conditions de visibilité des corps. — Sources lumineuses directes : corps quelconques. 81
§ 2. Lois de la réflexion spéculaire. — Égalité des angles d'incidence et de réflexion des rayons lumineux 85
§ 3. Images produites par la réflexion de la lumière sur les miroirs plans 90
§ 4. Images multiples produites par des combinaisons de miroirs 94
§ 5. Images dans les miroirs courbes. — Miroirs sphériques concaves et convexes. 99
§ 6. Images dans les miroirs cylindriques ou coniques. — Anamorphose 111
§ 7. Lumière irrégulièrement réfléchie ou lumière diffuse 113



Chapitre V. — Réfraction de la lumière 117
§ 1. Phénomènes de réfraction 117
§ 2. Lois de la réfraction de la lumière. 121
§ 3. Phénomènes de réflexion totale 128
§ 4. La réfraction dans l'atmosphère. 132

Chapitre VI. — Réfraction dans les prismes et les lentilles. 134
§ 1. Réfraction dans les lames transparentes à faces parallèles 134
§ 2. Réfraction dans les prismes. 138
§ 3. Réfraction dans les lentilles 141
§ 4. Images formées par les lentilles 148

Chapitre VII. — Dispersion de la lumière 154
§ 1. Décomposition de la lumière solaire par la réfraction. 154
§ 2. Recomposition ou synthèse de la lumière 159
§ 3. Les raies du spectre solaire. — Analyse spectrale. 164
§ 4. Analyse spectrale. — Méthode, instruments et procédés d'observation. . . . 169
§ 5. Spectres des métaux et des métalloïdes. — Principaux gaz simples. Découverte de nouveaux métaux par l'analyse spectrale. 177

Chapitre VIII. — Analyse spectrale des corps célestes 179
§ 1. Applications de la spectroscopie à l'astronomie : constitution physico-chimique du Soleil, des planètes, des comètes. 179
§ 2. L'analyse spectrale appliquée à l'étude des étoiles et des nébuleuses 200
§ 3. Analyse spectrale de la lumière des nébuleuses. 211
§ 4. L'analyse spectrale et la question des mouvements réels des étoiles. 214

Chapitre IX. — Les radiations solaires lumineuses calorifiques et chimiques . . . 217
§ 1. Coexistence des propriétés lumineuse, calorifique et chimique du spectre. . 217
§ 2. Radiations calorifiques du spectre. — Spectre ultra-rouge 221
§ 3. Radiations chimiques du spectre. — Spectre ultra-violet. 224
§ 4. Identité des trois radiations, lumineuse, calorifique et chimique. 228

Chapitre X. — Les sources de lumière. — Production et transformation des radiations. 231
§ 1. L'incandescence. — Incandescence des solides et des liquides. 231
§ 2. Incandescence des gaz. 235
§ 3. Lumières artificielles d'une grande intensité. — Lumière Drummond; éclairage au magnésium. — Intensité lumineuse de l'arc voltaïque. 240
§ 4. Phosphorescence 242
§ 5. La phosphorescence. — Conditions et causes des phénomènes. 251
§ 6. Phénomènes de fluorescence 256
§ 7. Transformation des radiations. — Calorescence. 260
§ 8. Décomposition de la lumière par absorption 263

Chapitre XI. — Qu'est-ce que la lumière? 271
§ 1. Anciennes hypothèses sur la nature de la lumière. 271
§ 2. Théorie de l'émission 273
§ 3. Théorie des ondulations 277

Chapitre XII. — Phénomènes de diffraction. 283
§ 1. Interférence des ondes lumineuses. — Phénomènes de diffraction. 283
§ 2. Phénomènes de diffraction par les petites ouvertures. 290
§ 3. Les réseaux. — Franges polychromatiques. 293
§ 4. Anneaux colorés dans les lames minces. 296
§ 5. Théorie des ondulations. — Réflexion et réfraction de la lumière. 306

CHAPITRE XIII. — DOUBLE RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE. . . . . . .
§ 1. Phénomènes de double réfraction dans les cristaux à un axe
§ 2. Double réfraction dans les cristaux à deux axes . . . . .

CHAPITRE XIV. — POLARISATION DE LA LUMIÈRE . . . .
§ 1. Polarisation de la lumière par double réfraction. . . . .
§ 2. Polarisation par réflexion. . . . .
§ 3. Couleurs de la lumière polarisée. . . . .
§ 4. Direction transversale des vibrations lumineuses. . . . .

CHAPITRE XV. — LES COULEURS DES CORPS . . . .
§ 1. Couleurs des solides et des liquides incandescents . . . .
§ 2. Couleurs des flammes . . . .
§ 3. Couleurs des corps opaques. — Théorie de Newton . . . .
§ 4. Classification des couleurs. . . . .
§ 5. Couleurs des corps transparents ou lucides. — Dichroïsme .
§ 6. Couleur bleue de l'atmosphère. . . . .
§ 7. Influence des lumières artificielles sur les couleurs des corps

CHAPITRE XVI. — PHOTOMÉTRIE . . . .
§ 1. Principes de photométrie. . . . .
§ 2. Procédés photométriques. . . . .

CHAPITRE XVII. — L'ŒIL ET LA VISION. . . . .
§ 1. Description de l'organe de la vision chez l'homme. . . . .
§ 2. Persistance de l'impression lumineuse . . . .
§ 3. Illusions d'optique. . . . .
§ 4. La vision chez les animaux. . . . .

CHAPITRE XVIII. — LA LUMIÈRE ET LA VIE . . . .
§ 1. Influence de la lumière sur la vie végétale. . . . .
§ 2. Influence de la lumière sur la vie animale. . . . .

CHAPITRE XIX. — LES MÉTÉORES OPTIQUES . . . .
§ 1. Aurores et crépuscules. . . . .
§ 2. Le mirage. . . . .
§ 3. L'arc-en-ciel. . . . .
§ 4. Halos solaires. — Parhélies, parasélènes . . . .

DEUXIÈME PARTIE

OPTIQUE — APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES ET DES LO

CHAPITRE PREMIER. — LES MIROIRS ET LES INSTRUMENTS DE RÉFLEXION.
§ 1. Les miroirs . . . .
§ 2. Les miroirs magiques . . . .
§ 3. Le sextant. . . . .
§ 4. Les goniomètres . . . .
§ 5. Les héliostats . . . .
§ 6. Le sidérostat. . . . .

Chapitre II. — Les phares . . . . [illegible]
§ 1. [illegible]. — Premiers phares de réflexion ou [illegible] . . . . [illegible]
§ 2. Phares de réfraction ou dioptriques. — Appareils [illegible] de Fresnel . . [illegible]
Chapitre III. — Le microscope. . . . . [illegible]
§ 1. La loupe. . . . . [illegible]
§ 2. Le microscope simple. — [illegible] de [illegible] . . . . [illegible]
§ 3. Le microscope composé. . . . . [illegible]
§ 4. Le microscope solaire. . . . . [illegible]
§ 5. Applications scientifiques du microscope. . . . . [illegible]
§ 6. Chambre noire. — Mégascope. — Lanterne magique . . . . [illegible]
Chapitre IV. — Le télescope . . . . [illegible]
§ 1. Les lunettes. — Lunette de Galilée. — Achromatisme. . . . . [illegible]
§ 2. Lunette astronomique. . . . . [illegible]
§ 3. Lunette terrestre ou longue-vue. . . . . [illegible]
§ 4. Les télescopes catadioptriques. . . . . [illegible]
§ 5. Avantages et inconvénients respectifs des lunettes et des télescopes. . . . . [illegible]
Chapitre V. — Le stéréoscope . . . . [illegible]
§ 1. La vision en relief. — Le stéréoscope de réflexion de Wheatstone . . . . . [illegible]
§ 2. Stéréoscope de réfraction de Brewster. — Stéréoscope d'Helmholtz. Pseudoscope. [illegible]
§ 3. Appareils basés sur la persistance des impressions lumineuses. . . . . . . [illegible]
Chapitre VI. — Photographie . . . . [illegible]
§ 1. Premiers essais de fixation des images de la chambre obscure. — Découvertes de Niepce et de Daguerre. . . . . [illegible]
§ 2. Daguerréotypie ou photographie daguerrienne . . . . [illegible]
§ 3. Perfectionnements apportés au procédé de Daguerre 586
Chapitre VII. — Photographie sur papier et sur verre. 591
§ 1. Photographie sur papier. — Invention de Talbot. — Procédé Blanquard-Évrard 591
§ 2. Photographie sur verre albuminé 595
§ 3. Photographie sur collodion 596
§ 4. L'appareil optique du photographe. 599
§ 5. Photographie à la lumière artificielle. 603
§ 6. Épreuves amplifiées. — Photographie microscopique 605
§ 7. Photographies instantanées. 612
Chapitre VIII. — Héliogravure. — Photolithographie. 618
§ 1. Impression aux sels d'or et d'argent, à la gélatine bichromatée 618
§ 2. Héliogravure et photolithographie ; premiers essais 621
§ 3. Photolithographie ; procédé dit au charbon de M. Poitevin 623
§ 4. Photogravure. — Phototypie 625
§ 5. Photoglyptie ou procédé Woodbury, ... 631
§ 6. Héliochromie. 633
Chapitre IX. — Applications de la photographie. 637
§ 1. Applications de la photographie aux arts et aux sciences physiques et naturelles. 637
§ 2. La photographie appliquée à l'astronomie 641
§ 3. Applications diverses de la photographie. 649

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

2559. — Imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.

ERRATA

Premier volume du MONDE PHYSIQUE.

Pages	Lignes	Au lieu de	l
24	23	millimètre carré	mil
92	16	*p*	
92	29	7	
181	29	diminution	di
182	5	croissante	coı
206	7	Circonférence équatoriale	Ellipse ı
206	8	Ellipse méridienne	Circonféren
227	29	$t = a$	*t*.
306	5	les premiers	le p
473	21	échappement	échau
510	29	à 50	à !
510	30	à 100	à 1
510	32	50 degrés... 100 degrés	100 degrés,.
868	24	LA PESANTEUR	LA GRA

Second volume du MONDE PHYSIQUE.

Les figures 220, 221 et 222 (pages 396 et 399) ne portent point les
l'intelligence du texte ; leur substituer les suivantes :



Fig. 220.



Fig. 221.



Fig. 222.





